

## ABSTRACT AND REFERENCES

## APPLIED MECHANICS

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.245121

**DESIGNING AN OUTER TOOTHED GEAR  
WHOSE WHEEL TEETH ARE OUTLINED BY THE  
LOGARITHMIC SPIRAL ARCS (p. 6–11)****Serhii Pylypaka**National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,  
Kyiv, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1496-4615>**Tetiana Kresan**Separated Subdivision of the National University of Life  
and Environmental Sciences of Ukraine  
“Nizhyn Agrotechnical Institute”, Nizhyn, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8280-9502>**Tatiana Volina**National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,  
Kyiv, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8610-2208>**Iryna Hryshchenko**National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,  
Kyiv, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1000-9805>**Liubov Pshenychna**Sumy State Pedagogical University named after A. S. Makarenko,  
Sumy, UkraineORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2840-2189>**Oleksandr Tatsenko**

Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1762-8219>

Toothed gears are the most common mechanical gears in machine building, which are characterized by high reliability and durability, a constant transfer number, and which can transmit high torque. During toothed gear operation, the surfaces of the teeth slide, which gives rise to friction forces and wears their working surfaces. To prevent this, the surfaces of the teeth need constant lubrication. This paper considers the design of a gear tooth engagement, which does not have friction between the surfaces of the teeth since they roll over each other without slipping. The profile of the tooth of such a gear is outlined by congruent arcs, symmetrical relative to the line that connects the center of rotation of the toothed wheel with the top of the tooth. These symmetrical curves at the top of the tooth intersect at the predefined angle. In the depressions of the wheel, adjacent teeth also intersect at the same angle. Such a condition can be ensured by a curve that at all its points crosses the radius-vector emanating from the coordinate origin, also at a stable angle equal to half of the given one. This curve is a logarithmic spiral. If the number of teeth of the drive and driven wheels is the same, then their teeth are congruent. Otherwise, the profiles of the teeth would differ but they could be outlined by congruent arcs of the same logarithmic spiral of the same length taken from different areas of the curve.

The minimum possible angle at the top of the teeth is straight. At acute angle, the toothed gear operation is impossible. To build gear wheels with a right angle at the top of the tooth, it would suffice to set the number of teeth of the drive and driven wheels. The center-to-center distance is calculated using the derived formula.

The transfer number of such a gear is variable but, with an increase in the number of teeth, the range of its change decreases. The algorithm of wheel construction is given.

**Keywords:** toothed gear, logarithmic spiral, surface rolling, center-to-center distance, arc length.

**References**

- Konopatskiy, E., Voronova, O., Bezditnyi, A., Shevchuk, O. (2020). About one method of numeral decision of differential equalizations in partials using geometric interpolants. CPT2020 The 8th International Scientific Conference on Computing in Physics and Technology Proceedings. doi: [https://doi.org/10.30987/conference\\_article\\_5fce27708eb353.92843700](https://doi.org/10.30987/conference_article_5fce27708eb353.92843700)
- Konopatskiy, E. V., Bezditnyi, A. A. (2020). Geometric modeling of multifactor processes and phenomena by the multidimensional parabolic interpolation method. Journal of Physics: Conference Series, 1441 (1), 012063. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1441/1/012063>
- Konopatskiy, E., Bezditnyi, A., Shevchuk, O. (2020). Modeling Geometric Varieties with Given Differential Characteristics and Its Application. Proceedings of the 30th International Conference on Computer Graphics and Machine Vision (GraphiCon 2020). Part 2, short31-1–short31-8. doi: <https://doi.org/10.51130/graphicon31-4-2-2020->
- Tarelnyk, V., Martsynkovskyy, V., Gaponova, O., Konoplianchenko, I., Dovzyk, M., Tarelnyk, N., Gorovoy, S. (2017). New sulphiding method for steel and cast iron parts. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 233, 012049. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/233/1/012049>
- Tarelnyk, V., Martsynkovskyy, V., Gaponova, O., Konoplianchenko, I., Belous, A., Gerasimenko, V., Zakharov, M. (2017). New method for strengthening surfaces of heat treated steel parts. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 233, 012048. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/233/1/012048>
- Tarelnik, V. B., Martsinkovskii, V. S., Zhukov, A. N. (2017). Increase in the Reliability and Durability of Metal Impulse End Seals. Part 1. Chemical and Petroleum Engineering, 53 (1-2), 114–120. doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0305-y>
- Martsinkovsky, V., Yurko, V., Tarelnik, V., Filonenko, Y. (2012). Designing Thrust Sliding Bearings of High Bearing Capacity. Procedia Engineering, 39, 148–156. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.019>
- Kresan, T., Pylypaka, S., Ruzhylo, Z., Rogovskii, I., Trokhaniak, O. (2020). External rolling of a polygon on closed curvilinear profile. Acta Polytechnica, 60 (4), 313–317. doi: <https://doi.org/10.14311/ap.2020.60.0313>
- Kresan, T., Pylypaka, S., Grischenko, I., Babka, V. (2020). A special case of congruent centroids of noncircular wheels formed by arcs of the logarithmic spiral. Applied geometry and engineering graphics, 98, 84–93. doi: <https://doi.org/10.32347/0131-579x.2020.98.84-93>
- Lyashkov, A. A., Panchuk, K. L., Khasanova, I. A. (2018). Automated Geometric and Computer-aided Non-Circular Gear Formation Modeling. Journal of Physics: Conference Series, 1050, 012049. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1050/1/012049>
- Lyashkov, A. A., Reinhard, A. J., Murashev, G. E. (2019). Geometric And Computer Modeling of Forming the Gear Wheels with Elliptical Centroid. Journal of Physics: Conference Series, 1260 (11), 112018. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/11/112018>

12. Lin, C., Wu, X. (2018). Calculation and Characteristic Analysis of Tooth Width of Eccentric Helical Curve-Face Gear. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 43 (4), 781–797. doi: <https://doi.org/10.1007/s40997-018-0239-9>
13. Konopatskiy, E. V., Bezdityni, A. A. (2019). Geometric modeling and optimization of multidimensional data in Radishev integrated drawing. *Journal of Physics: Conference Series*, 1260 (7), 072006. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1260/7/072006>

---

**DOI: 10.15587/1729-4061.2021.246533**  
**METHOD FOR ANALYTICAL DESCRIPTION AND MODELING OF THE WORKING SPACE OF A MANIPULATION ROBOT (p. 12–20)**

**Akambay Beisembayev**

Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4763-0769>

**Anargul Yerbossynova**

Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1042-1234>

**Petro Pavlenko**

National Aviation University, Kyiv, Ukraine  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2581-230X>

**Mukhit Baibatsbayev**

Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-2106-4885>

This paper reports a method, built in the form of a logic function, for describing the working spaces of manipulation robots analytically. A working space is defined as a work area or reachable area by a manipulation robot. An example of describing the working space of a manipulation robot with seven rotational degrees of mobility has been considered.

Technological processes in robotic industries can be associated with the positioning of the grip, at the required points, in the predefined coordinates, or with the execution of the movement of a working body along the predefined trajectories, which can also be determined using the required points in the predefined coordinates. A necessary condition for a manipulation robot to execute a specified process is that all the required positioning points should be within a working space.

To solve this task, a method is proposed that involves the analysis of the kinematic scheme of a manipulation robot in order to acquire a graphic image of the working space to identify boundary surfaces, as well as identify additional surfaces. The working space is limited by a set of boundary surfaces where additional surfaces are needed to highlight parts of the working space. Specifying each surface as a logic function, the working space is described piece by piece. Next, the resulting parts are combined with a logical expression, which is a disjunctive normal form of logic functions, which is an analytical description of the working space.

The correspondence of the obtained analytical description to the original graphic image of working space is verified by simulating the disjunctive normal form of logic functions using MATLAB (USA).

**Keywords:** manipulation robot, working space boundary, elementary surface, logic function.

#### References

1. Rastegar, J., Fardanesh, B. (1990). Manipulation workspace analysis using the Monte Carlo Method. *Mechanism and Machine*

- Theory*, 25 (2), 233–239. doi: [https://doi.org/10.1016/0094-114x\(90\)90124-3](https://doi.org/10.1016/0094-114x(90)90124-3)
2. Ceccarelli, M., Liang, C. (2013). A formulation for automatic generation of workspace boundary of N-R manipulators. *International Journal of Mechanisms and Robotic Systems*, 1 (1), 2. doi: <https://doi.org/10.1504/ijmrs.2013.051286>
3. Madrid, E., Ceccarelli, M. (2014). Numerical solution for designing telescopic manipulators with prescribed workspace points. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 30 (2), 201–205. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2013.09.013>
4. Cao, Y., Lu, K., Li, X., Zang, Y. (2011). Accurate Numerical Methods for Computing 2D and 3D Robot Workspace. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 8 (6), 76. doi: <https://doi.org/10.5772/45686>
5. Liu, Z., Liu, H., Luo, Z., Zhang, X. (2013). Improvement on Monte Carlo method for robot workspace determination. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 44 (1), 230–235. doi: <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2013.01.043>
6. Burlibay, A. A., Beisembaev, A. A., Wójcik, W. (2014). Description of the manipulator robot's workspaces with three mobility degrees in the form of the logical expressions. *PRZEGLĄD ELEKTRO-TECHNICZNY*, 90 (8), 25–29. Available at: <http://pe.org.pl/articles/2014/8/6.pdf>
7. Li, J., Zhao, F., Li, X., Li, J. (2016). Analysis of robotic workspace based on Monte Carlo method and the posture matrix. 2016 IEEE International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE). doi: <https://doi.org/10.1109/iccre.2016.7476145>
8. Peidró, A., Reinoso, Ó., Gil, A., Marín, J. M., Payá, L. (2017). An improved Monte Carlo method based on Gaussian growth to calculate the workspace of robots. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 64, 197–207. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2017.06.009>
9. Jauer, P., Kuhlemann, I., Ernst, F., Schweikard, A. (2016). GPU-based real-time 3D workspace generation of arbitrary serial manipulators. 2016 2nd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR). doi: <https://doi.org/10.1109/iccar.2016.7486698>
10. Zhao, Z., He, S., Zhao, Y., Xu, C., Wu, Q., Xu, Z. (2018). Workspace Analysis for a 9-DOF Hyper-redundant Manipulator Based on An Improved Monte Carlo Method and Voxel Algorithm. 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). doi: <https://doi.org/10.1109/icma.2018.8484734>
11. Zhu, J., Tian, F. (2018). Kinematics Analysis and Workspace Calculation of a 3-DOF Manipulator. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 170, 042166. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/170/4/042166>
12. Fu, G., Tao, C., Gu, T., Lu, C., Gao, H., Deng, X. (2020). A Workspace Visualization Method for a Multijoint Industrial Robot Based on the 3D-Printing Layering Concept. *Applied Sciences*, 10 (15), 5241. doi: <https://doi.org/10.3390/app10155241>

---

**DOI: 10.15587/1729-4061.2021.245591**  
**ANALYTICAL SOLUTION OF THE PROBLEM OF DYNAMIC SYNTHESIS OF A SIX-LINK STRAIGHT-LINE CONVERTING MECHANISM OF THE SUCKER-ROD PUMPING DRIVE (p. 21–28)**

**Ayaulym Rakhmatulina**

Institute of Mechanics and Engineering Science  
 named after academician U. A. Dzholdasbekov KN MES RK,  
 Almaty, Republic of Kazakhstan  
 Almaty Technological University, Almaty, Republic of Kazakhstan  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6670-7496>

**Sayat Ibrayev**

Institute of Mechanics and Engineering Science  
named after academician U. A. Dzholdasbekov KN MES RK,  
Almaty, Republic of Kazakhstan

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6265-5745>

**Nurbibi Imanbayeva**

Institute of Mechanics and Engineering Science named after  
academician U. A. Dzholdasbekov KN MES RK, Almaty, Republic  
of Kazakhstan

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6889-3421>

**Assemgul Uderbayeva**

Almaty Technological University, Almaty, Republic of Kazakhstan

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1641-7404>

**Aiman Nurmaganbetova**

Kazakh Leading Academy of Architecture and Civil Engineering,  
Almaty, Republic of Kazakhstan

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1634-1796>

The paper presents an analytical solution to the problem of optimal dynamic balancing of the six-link converting mechanism of the sucker-rod pumping unit. This problem is solved numerically using a computer model of dynamics, namely by selecting the value of the correction factor  $k$ . Here we will consider an analytical method for solving this problem, that is, we find the location of the counterweight on the third link of the six-link converting mechanism for balancing. To solve the problem, we use the principle of possible displacement and write an equation where we express the torque through the unknown parameter of the counterweight. Further, such a value of the unknown parameter is found, at which the minimum of the root-mean-square value of torque  $M$  is reached. From the condition of the minimum of the function, we obtain an equation for determining the location of the counterweight. Thus, we obtain an analytical solution to the problem of optimal dynamic balancing of the six-link converting mechanism of the sucker-rod pumping drive in various settings.

According to the results, it was found that with the combined balancing method, the value of the maximum torque  $M$  and the value of the maximum power are reduced by 20 % than when the counterweight is placed on the third link of the converting mechanism, as well as when the value of the maximum torque is determined through the correction factor  $k$ .

In practice, balancing is carried out empirically by comparing two peaks of torque  $M$  on the crank shaft per cycle of the mechanism movement. Solving the analytical problem, we determine the exact location of the counterweight.

**Keywords:** sucker-rod pump drive, converting mechanism, balancer, optimal balancing, dynamic synthesis.

**References**

- Rakhmatulina, A., Ibrayev, S., Imanbayeva, N., Ibrayeva, A., Tolebayev, N. (2020). Kinematic and kinetostatic analysis of the six-link straight-line generating converting mechanism of the unbalanced sucker rod pumper drive. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (7 (108)), 6–13. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.218551>
- Alyushin, Yu. (2015). *Strukturnyy, kinematicheskiy i dinamicheskiy analiz rychaznykh mekhanizmov*. Moscow: MISiS, 104. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/328095841\\_Strukturnyj\\_kinematicheskiy\\_i\\_dinamicheskiy\\_analiz\\_rychaznykh\\_mekhanizmov](https://www.researchgate.net/publication/328095841_Strukturnyj_kinematicheskiy_i_dinamicheskiy_analiz_rychaznykh_mekhanizmov)
- Chaudhary, K., Chaudhary, H. (2015). Shape Optimization of Dynamically Balanced Planar Four-bar Mechanism. *Procedia Computer Science*, 57, 519–526. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.378>
- Artyuh, V. G., Mel'nikov, B. E., Chernysheva, N. V., Chigareva, I. N., Mazur, V. O. (2020). Issledovanie mekhanizma uravnoveshivaniya podviznykh chastei prokatnoy kleti. *Teoriya mekhanizmov i mashin*, 18 (2 (46)), 54–66. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44140602>
- Gebel', E. S., Homchenko, V. G., Klevakin, V. V. (2012). Kinetostaticheskoe issledovanie ploskogo rychazhnogo mekhanizma III klassa s vystoem vyhodnogo zvena. *Materialy 4-oy mezhdunar. konf. Vol. 1*. Ulan-Ude: VSGTU, 19–28.
- Tashilin, L. N. (2018). Analytical method of kinematic analysis lever mechanisms. *Computational nanotechnology*, 3, 16–19. Available at: <http://www.mathnet.ru/links/fafc2d6bb26a1b6a27e1e86561e92a30/cn194.pdf>
- Minzheng, J., Deshi, Z., Zi-Ming, F., Tianyu, D. (2019). Dynamic Model and Analysis of a Sucker-rod Pump Injection-production System. *Tekhnicheskii vjesnik*, 26 (5), 1451–1460. doi: <https://doi.org/10.17559/tv-20190215172608>
- Van der Wijk, V. (2017). On the Grand 4R Four-Bar Based Inherently Balanced Linkage Architecture. *Mechanisms and Machine Science*, 473–480. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-44156-6\\_48](https://doi.org/10.1007/978-3-319-44156-6_48)
- Langbauer, C., Langbauer, T., Fruhwirth, R., Mastobaev, B. (2021). Sucker rod pump frequency-elastic drive mode development – from the numerical model to the field test. *Liquid and Gaseous Energy Resources*, 1 (1), 64–85. doi: <https://doi.org/10.21595/lger.2021.22074>
- Feng, Z., Ma, Q., Liu, X., Cui, W., Tan, C., Liu, Y. (2020). Dynamic coupling modelling and application case analysis of high-slip motors and pumping units. *PLOS ONE*, 15 (1), e0227827. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227827>

**DOI: 10.15587/1729-4061.2021.247500**

**BEHAVIOR OF SOLUTION OF THE ELASTICITY PROBLEM FOR A RADIAL INHOMOGENEOUS CYLINDER WITH SMALL THICKNESS (p. 29–42)**

**Natik Akhmedov**

Azerbaijan State Economic University (UNEC), Baku, Azerbaijan  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3071-2549>

**Sevda Akbarova**

Azerbaijan State Economic University (UNEC), Baku, Azerbaijan  
**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3879-8372>

A non-axisymmetric problem of the theory of elasticity for a radial inhomogeneous cylinder of small thickness is studied. It is assumed that the elastic moduli are arbitrary positive piecewise continuous functions of a variable along the radius.

Using the method of asymptotic integration of the equations of the theory of elasticity, based on three iterative processes, a qualitative analysis of the stress-strain state of a radial inhomogeneous cylinder is carried out. On the basis of the first iterative process of the method of asymptotic integration of the equations of the theory of elasticity, particular solutions of the equilibrium equations are constructed in the case when a smooth load is specified on the lateral surface of the cylinder. An algorithm for constructing partial solutions of the equilibrium equations for special types of loads, the lateral surface of which is loaded by forces polynomially dependent on the axial coordinate, is carried out.

Homogeneous solutions are constructed, i.e., any solutions of the equilibrium equations that satisfy the condition of the absence of stresses on the lateral surfaces. It is shown that homogeneous solutions are composed of three types: penetrating solutions, solu-

tions of the simple edge effect type, and boundary layer solutions. The nature of the stress-strain state is established. It is found that the penetrating solution and solutions having the character of the edge effect determine the internal stress-strain state of a radial inhomogeneous cylinder. Solutions that have the character of a boundary layer are localized at the ends of the cylinder and exponentially decrease with distance from the ends. These solutions are absent in applied shell theories.

Based on the obtained asymptotic expansions of homogeneous solutions, it is possible to carry out estimates to determine the range of applicability of existing applied theories for cylindrical shells. Based on the constructed solutions, it is possible to propose a new refined applied theory.

**Keywords:** non-axisymmetric problem, radial inhomogeneous cylinder, asymptotic integration method, homogeneous solutions, boundary layer.

### References

- Birman, V., Byrd, L. W. (2007). Modeling and Analysis of Functionally Graded Materials and Structures. *Applied Mechanics Reviews*, 60 (5), 195–216. doi: <https://doi.org/10.1115/1.2777164>
- Tokovyy, Y., Ma, C.-C. (2019). Elastic Analysis of Inhomogeneous Solids: History and Development in Brief. *Journal of Mechanics*, 35 (5), 613–626. doi: <https://doi.org/10.1017/jmech.2018.57>
- Akhmedov, N. K., Ustinov, Yu. A. (1988). On St. Venant's principle in the torsion problem for a laminated cylinder. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 52 (2), 207–210. doi: [https://doi.org/10.1016/0021-8928\(88\)90136-0](https://doi.org/10.1016/0021-8928(88)90136-0)
- Ahmedov, N. K. (1997). Analiz pograničnogo sloya v osesimmetrichnoy zadache teorii uprugosti dlya radial'no-sloistogo tsilindra i rasprostraneniya osesimmetrichnyh voln. *Prikladnaya matematika i mekhanika*, 61 (5), 863–872.
- Akhmedov, N., Akbarova, S., Ismayilova, J. (2019). Analysis of axisymmetric problem from the theory of elasticity for an isotropic cylinder of small thickness with alternating elasticity modules. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (7 (98)), 13–19. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.162153>
- Ismayilova, J. (2019). Studying of elastic equilibrium of a small thickness isotropic cylinder with variable elasticity module. *Transactions of NAS of Azerbaijan, ISSUE Mechanics*, 39 (8), 17–23. Available at: [http://transmech.imm.az/upload/articles/v-40/Jalala\\_Ismayilova\\_Trans\\_Mech\\_Vol\\_39\\_8\\_2019.pdf](http://transmech.imm.az/upload/articles/v-40/Jalala_Ismayilova_Trans_Mech_Vol_39_8_2019.pdf)
- Ismayilova, J. J. (2017). The problem of torsion of a radially inhomogeneous cylinder. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Mechanical-technological systems and complexes*, 16 (1238), 82–87. Available at: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/30089>
- Ismayilova, D. D. (2017). Analysis of a problem of torsion of a cylinder with variable shear modulus with fastened lateral surface. *Scientific works*, 1, 88–93. Available at: [http://www.aztu.edu.az/azp/elmi\\_tedqiqat/scientific\\_research\\_2/az/files/jurnal\\_2017\\_1/14.pdf](http://www.aztu.edu.az/azp/elmi_tedqiqat/scientific_research_2/az/files/jurnal_2017_1/14.pdf)
- Akhmedov, N. K., Akperova, S. B. (2011). Asymptotic analysis of a 3D elasticity problem for a radially inhomogeneous transversally isotropic hollow cylinder. *Mechanics of Solids*, 46 (4), 635–644. doi: <https://doi.org/10.3103/s0025654411040133>
- Huang, C. H., Dong, S. B. (2001). Analysis of laminated circular cylinders of materials with the most general form of cylindrical anisotropy. *International Journal of Solids and Structures*, 38 (34-35), 6163–6182. doi: [https://doi.org/10.1016/s0020-7683\(00\)00374-7](https://doi.org/10.1016/s0020-7683(00)00374-7)
- Lin, H.-C., Dong, S. B. (2006). On the Almansi-Michell Problems for an Inhomogeneous, Anisotropic Cylinder. *Journal of Mechanics*, 22 (1), 51–57. doi: <https://doi.org/10.1017/s1727719100000782>
- Horgan, C. O., Chan, A. M. (1999). The pressurized hollow cylinder or disk problem for functionally graded isotropic linearly elastic materials. *Journal of Elasticity*, 55, 43–59. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1007625401963>
- Ieşan, D., Quintanilla, R. (2007). On the deformation of inhomogeneous orthotropic elastic cylinders. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 26 (6), 999–1015. doi: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2007.03.004>
- Grigorenko, A. Y., Yaremchenko, S. N. (2016). Analysis of the Stress–Strain State of Inhomogeneous Hollow Cylinders. *International Applied Mechanics*, 52 (4), 342–349. doi: <https://doi.org/10.1007/s10778-016-0757-3>
- Grigorenko, A. Y., Yaremchenko, S. N. (2019). Three-Dimensional Analysis of the Stress–Strain State of Inhomogeneous Hollow Cylinders Using Various Approaches. *International Applied Mechanics*, 55 (5), 487–494. doi: <https://doi.org/10.1007/s10778-019-00970-2>
- Tutuncu, N., Temel, B. (2009). A novel approach to stress analysis of pressurized FGM cylinders, disks and spheres. *Composite Structures*, 91 (3), 385–390. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.06.009>
- Zhang, X., Hasebe, N. (1999). Elasticity Solution for a Radially Non-homogeneous Hollow Circular Cylinder. *Journal of Applied Mechanics*, 66 (3), 598–606. doi: <https://doi.org/10.1115/1.2791477>
- Tokovyy, Y., Ma, C.-C. (2016). Axisymmetric Stresses in an Elastic Radially Inhomogeneous Cylinder Under Length-Varying Loadings. *Journal of Applied Mechanics*, 83 (11). doi: <https://doi.org/10.1115/1.4034459>
- Liew, K. M., Kitipornchai, S., Zhang, X. Z., Lim, C. W. (2003). Analysis of the thermal stress behaviour of functionally graded hollow circular cylinders. *International Journal of Solids and Structures*, 40 (10), 2355–2380. doi: [https://doi.org/10.1016/s0020-7683\(03\)00061-1](https://doi.org/10.1016/s0020-7683(03)00061-1)
- Jabbari, M., Bahtui, A., Eslami, M. R. (2006). Axisymmetric Mechanical and Thermal Stresses in Thick Long FGM Cylinders. *Journal of Thermal Stresses*, 29 (7), 643–663. doi: <https://doi.org/10.1080/01495730500499118>
- Kordkheili, S. A. H., Naghdabadi, R. (2007). Thermoelastic Analysis of Functionally Graded Cylinders Under Axial Loading. *Journal of Thermal Stresses*, 31 (1), 1–17. doi: <https://doi.org/10.1080/01495730701737803>
- Tarn, J.-Q. (2001). Exact solutions for functionally graded anisotropic cylinders subjected to thermal and mechanical loads. *International Journal of Solids and Structures*, 38 (46-47), 8189–8206. doi: [https://doi.org/10.1016/s0020-7683\(01\)00182-2](https://doi.org/10.1016/s0020-7683(01)00182-2)
- Zimmerman, R. W., Lut, M. P. (1999). Thermal stresses and thermal expansion in a uniformly heated functionally graded cylinder. *Journal of Thermal Stresses*, 22 (2), 177–188. doi: <https://doi.org/10.1080/014957399280959>
- Tarn, J.-Q., Chang, H.-H. (2005). Extension, Torsion, Bending, Pressuring, and Shearing of Piezoelectric Circular Cylinders with Radial Inhomogeneity. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 16 (7-8), 631–641. doi: <https://doi.org/10.1177/1045389x05048144>
- Lur'e, A. I. (1970). *Teoriya uprugosti*. Moscow: Nauka, 939. Available at: <https://lib-bkm.ru/load/86-1-0-2388>
- Ustinov, Yu. A. (2006). *Matematicheskaya teoriya poperechno-neodnorodnyh plit*. Rostov-na Donu: OOO "TSVVVR", 257.
- Gol'denveyzer, A. L. (1963). *Postroenie priblizhennoy teorii izgiba obolochki pri pomoschi asimptoticheskogo integrirvaniya uravneniy teorii uprugosti*. *Prikladnaya matematika i mekhanika*, 27 (4), 593–608.



28. Akhmedov, N. K., Sofiyev, A. H. (2019). Asymptotic analysis of three-dimensional problem of elasticity theory for radially inhomogeneous transversally-isotropic thin hollow spheres. *Thin-Walled Structures*, 139, 232–241. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.03.022>
29. Mekhtiev, M. F. (2018). *Vibrations of hollow elastic bodies*. Springer, 212. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-74354-7>
30. Mekhtiev, M. F. (2019). Asymptotic analysis of spatial problems in elasticity. Springer, 241. doi: <https://doi.org/10.1007/978-981-13-3062-9>

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.245885

## DETERMINING THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF ELASTIC SHELL STRUCTURES (p. 43–51)

**Irina Polyakova**

Kazakh Leading Academy of Architecture and Civil Engineering,  
Almaty, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4080-5423>

**Raikhhan Imambayeva**

Kazakh Leading Academy of Architecture and Civil Engineering,  
Almaty, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0806-3308>

**Bakyt Aubakirova**

Kazakh Leading Academy of Architecture and Civil Engineering,  
Almaty, Republic of Kazakhstan

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3064-5876>

Building structures are very often operated under the action of dynamic loads, both natural and man-made. The calculation of structures under the influence of static loads has been quite widely studied in detail. When structures are exposed to dynamic loads, additional tests are carried out, where measuring instruments are installed on the structures to register stresses and deformations that occur during dynamic influences. Elastic elements are the responsible functional unit of many measuring instruments. Therefore, the quality of elastic elements ensures the operational stability of the entire structure. This determines the increased attention that is paid to technology and construction to elastic elements. Previously, the work of elastic elements made of homogeneous mono materials with the same physical and geometric properties in all directions and over the entire surface of the element was studied.

The elastic element was considered as a shell of rotation with a complex shape of the meridian and various physical and mechanical properties at various points caused by uneven reinforcement. Two types of reinforcement were implied – radial and circular. Elastic shell elements (ESE) operate under conditions of dynamic loading. The equation was derived for determining the dynamic characteristics of inhomogeneous elastic elements. The dependences of the first three natural frequencies of oscillations on the thickness of the shell and the depth of the corrugation and the first two natural frequencies of oscillations on the thickness of the shell have been analyzed. The amplitude-frequency characteristics (AFC) and the phase-frequency characteristics (PFC) of the shell depending on the geometric parameters have been calculated. All these results could significantly improve the quality of the readings of the instruments, which depend on the sensitivity of the shell elastic elements. And it, in turn, depends on the geometric and physical properties of the shell elastic elements.

**Keywords:** phase-frequency characteristics (PFC), amplitude-frequency characteristics (AFC), shell elastic elements (SEE), boundary conditions, geometric parameters.

## References

1. Alfutov, N. A., Zinov'ev, P. A., Popov, B. (2009). *Raschet mnogosloynnyh plastin i obolochek iz kompozitsionnyh materialov*. Moscow: Mashinostroenie, 263. Available at: [https://www.studmed.ru/alfutov-na-zinovev-pa-popov-bg-raschet-mnogosloynnyh-plastin-i-obolochek-iz-kompozitsionnyh-materialov\\_a4d2eb5991d.html](https://www.studmed.ru/alfutov-na-zinovev-pa-popov-bg-raschet-mnogosloynnyh-plastin-i-obolochek-iz-kompozitsionnyh-materialov_a4d2eb5991d.html)
2. Andreeva, L. E. (1962). *Uprugie elementy priborov*. Moscow: Mir knig, 462. Available at: <https://xn--c1ajahiit.ws/knigi/nehudozhestvennye/nauka-i-texnika/163629-andreeva-l-e-uprugie-elementy-priborov.html>
3. Shimyrbaev, M. K. (1992). *Utochnennyye metody opredeleniya uprugih postoyannyh odnonapravlenno armirovannogo materiala*. Alma-Ata, 14.
4. Kurochka, K. S., Stefanovskiy, I. L. (2014). *Raschet mnogosloynnyh osesimmetrichnyh obolochek metodom konechnykh elementov*. Informatsionnye tehnologii i sistemy 2014 (ITS 2014): materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. Minsk, 214–215. Available at: <https://libeloc.bsuir.by/bitstream/123456789/2008/2/%d0%a0%d0%b0%d1%81%d1%87%d0%b5%d1%82%20%d0%bc%d0%bd%d0%be%d0%b3%d0%be%d1%81%d0%bb%d0%be%d0%b9%d0%bd%d1%8b%d0%b9%20%d0%be%d1%81%d0%b5%d1%81%d0%b8%d0%bc%d0%bc%d0%b5%d1%82%d1%80%d0%b8%d1%87%d0%bd%d1%8b%d1%85%20%d0%be%d0%b1%d0%be%d0%bb%d0%be%d1%87%d0%b5%d0%ba.PDF>
5. Golova, T. A., Andreeva, N. V. (2019). Analysis of methods of calculation of layered plates and shells for the calculation of multilayer structures. *The Eurasian Scientific Journal*, 5. Available at: <https://esj.today/PDF/41SAVN519.pdf>
6. Bazhenov, V. A., Solovei, N. A., Krivenko, O. P., Mishchenko, O. A. (2014). Modeling of nonlinear deformation and buckling of elastic inhomogeneities shells. *Stroitel'naya mehanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy*, 5, 14–33. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-nelineynogo-deformirovaniya-i-poteriustoychivosti-uprugih-neodorodnyh-obolochek>
7. Kairov, A. S., Vlasov, O. I., Latanskaya, L. A. (2017). Free vibrations of constructional non-homogeneous multilayer orthotropic composite cylindrical shells. *Visnyk Zaporizkoho natsionalnoho universytetu. Fyzyko-materatychni nauky*, 2, 57–65. Available at: <http://eir.nuos.edu.ua/xmlui/bitstream/handle/123456789/4559/Kairov%205.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
8. San'kov, P., Tkach, N., Voziiian, K., Lukianenko, V. (2016). Composite building materials and products. *International scientific journal*, 4 (1), 80–82. Available at: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/mnj\\_2016\\_4\(1\)\\_24](http://nbuv.gov.ua/UJRN/mnj_2016_4(1)_24)
9. Marasulov, A., Safarov, I. I., Abdraimova, G. A., Tolep, A. S. (2021). Own vibrations of ribbed truncated conical shell. *Vestnik KazNRTU*, 143 (3), 211–221. doi: <https://doi.org/10.51301/vest.su.2021.i3.28>
10. Potapov, A. N. (2018). About the free-vibration mode shapes of elastoplastic dissipative systems. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 14 (3), 114–125. doi: <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2018-14-3-114-125>
11. Yankovskii, A. P. (2020). The Refined Model of Viscoelastic-Plastic Deformation of Reinforced Cylindrical Shells. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 1, 138–149. doi: <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2020.1.11>
12. Bakulin, V. N. (2019). Posloynniy analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya trehsloynnyh obolochek s vrezkami. *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk. Mehanika Tverdogo Tela*, 2, 111–125. doi: <https://doi.org/10.1134/s0572329919020028>
13. Senjanović, I., Čakmak, D., Alujević, N., Čatipović, I., Vladimir, N., Cho, D.-S. (2019). Pressure and rotation induced tensional forces of toroidal shell and their influence on natural vibrations. *Mechanics*

- Research Communications, 96, 1–6. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2019.02.003>
14. Bazhenov, V. A., Luk'yanchenko, O. A., Vorona, Y. V., Kostina, E. V. (2018). Stability of the Parametric Vibrations of a Shell in the Form of a Hyperbolic Paraboloid. *International Applied Mechanics*, 54 (3), 274–286. doi: <https://doi.org/10.1007/s10778-018-0880-4>
  15. Ajarmah, B., Shitikova, M. (2019). Numerical analysis of nonlinear forced vibrations of a cylindrical shell with combinational internal resonance in a fractional viscoelastic medium. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 489, 012033. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/489/1/012033>
  16. Yang, S. W., Zhang, W., Mao, J. J. (2019). Nonlinear vibrations of carbon fiber reinforced polymer laminated cylindrical shell under non-normal boundary conditions with 1:2 internal resonance. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 74, 317–336. doi: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2018.11.014>
  17. Lugovoi, P. Z., Sirenko, V. N., Prokopenko, N. Y., Klimenko, K. V. (2017). Influence of the Parameters of a Non-Constant Disturbing Load on the Transient Process of Vibrations of a Ribbed Cylindrical Shell. *International Applied Mechanics*, 53 (6), 680–687. doi: <https://doi.org/10.1007/s10778-018-0850-x>
  18. Tornabene, F., Fantuzzi, N., Baccocchi, M. (2017). A new doubly-curved shell element for the free vibrations of arbitrarily shaped laminated structures based on Weak Formulation IsoGeometric Analysis. *Composite Structures*, 171, 429–461. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.03.055>

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.243990

**DETERMINING PATTERNS IN THERMOELASTIC INTERACTION BETWEEN A CRACK AND A CURVILINEAR INCLUSION LOCATED IN A CIRCULAR PLATE (p. 52–58)**

**Volodymyr Zelenyak**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6653-4326>

**Lubov Kolyasa**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9690-8042>

**Myroslava Klapchuk**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4826-0824>

**Oksana Oryshchyn**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8965-1891>

**Svitlana Vozna**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5354-2124>

A two-dimensional mathematical model of the thermoelastic state has been built for a circular plate containing a curvilinear inclusion and a crack, under the action of a uniformly distributed temperature across the entire piece-homogeneous plate. Using the apparatus of singular integral equations (SIEs), the problem was reduced to a system of two singular integral equations of the first and second kind on the contours of the crack and inclusion, respectively. Numerical solutions to the system of integral equations have been obtained for certain cases of the circular disk with an elliptical inclusion and a crack in the disk outside the inclusion, as well as within the inclusion. These solutions were applied to determine the stress intensity coefficients (SICs) at the tops of the crack.

Stress intensity coefficients could later be used to determine the critical temperature values in the disk at which a crack begins to grow. Therefore, such a model reflects, to some extent, the destruction mechanism of the elements of those engineering structures with cracks that are operated in the thermal power industry and, therefore, is relevant.

Graphic dependences of stress intensity coefficients on the shape of an inclusion have been built, as well as on its mechanical and thermal-physical characteristics, and a distance to the crack. This would make it possible to analyze the intensity of stresses in the neighborhood of the crack vertices, depending on geometric and mechanical factors.

The study's specific results, given in the form of plots, could prove useful in the development of rational modes of operation of structural elements in the form of circular plates with an inclusion hosting a crack.

The reported mathematical model builds on the earlier models of two-dimensional stationary problems of thermal conductivity and thermoelasticity for piece-homogeneous bodies with cracks.

**Keywords:** crack, inclusion, thermoelasticity, stress intensity coefficient, singular integral equation.

**References**

1. Choi, H. J. (2014). Thermoelastic interaction of two offset interfacial cracks in bonded dissimilar half-planes with a functionally graded interlayer. *Acta Mechanica*, 225 (7), 2111–2131. doi: <https://doi.org/10.1007/s00707-013-1080-2>
2. Rashidova, E. V., Sobol, B. V. (2017). An equilibrium internal transverse crack in a composite elastic half-plane. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 81 (3), 236–247. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jappmathmech.2017.08.016>
3. Chen, H., Wang, Q., Liu, G. R., Wang, Y., Sun, J. (2016). Simulation of thermoelastic crack problems using singular edge-based smoothed finite element method. *International Journal of Mechanical Sciences*, 115–116, 123–134. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.06.012>
4. Sekine, H. (1978). Thermal stresses around a ribbon-like inclusion in a semi-infinite medium under uniform heat flow. *Journal of Elasticity*, 8 (1), 81–95. doi: <https://doi.org/10.1007/bf00044511>
5. Tweed, J., Lowe, S. (1979). The thermoelastic problem for a half-plane with an internal line crack. *International Journal of Engineering Science*, 17 (4), 357–363. doi: [https://doi.org/10.1016/0020-7225\(79\)90071-5](https://doi.org/10.1016/0020-7225(79)90071-5)
6. Kryvyi, O. F. (2012). Interface circular inclusion under mixed conditions of interaction with a piecewise homogeneous transversally isotropic space. *Journal of Mathematical Sciences*, 184 (1), 101–119. doi: <https://doi.org/10.1007/s10958-012-0856-6>
7. Zelenyak, B. M. (2016). Thermoelastic Equilibrium of a Three-Layer Circular Hollow Cylinder Weakened by a Crack. *Materials Science*, 52 (2), 253–260. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9952-y>
8. Zelenyak, V. M., Kolyasa, L. I. (2016). Thermoelastic State of a Half Plane with Curvilinear Crack Under the Conditions of Local Heating. *Materials Science*, 52 (3), 315–322. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9959-4>
9. Konechny, S., Evtushenko, A., Zelenyak, V. (2001). Heating of the semispace with edge cracks by friction. *Trenie i Iznos*, 22 (1), 39–45. Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0035766285&partnerID=MN8TOARS>
10. Zelenyak, V. M. (2012). Thermoelastic interaction of a two-component circular inclusion with a crack in the plate. *Materials Science*, 48 (3), 301–307. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-012-9506-x>

11. Hasebe, N., Wang, X., Saito, T., Sheng, W. (2007). Interaction between a rigid inclusion and a line crack under uniform heat flux. *International Journal of Solids and Structures*, 44 (7-8), 2426–2441. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijssolstr.2006.07.016>
12. Kit, H. S., Chernyak, M. S. (2010). Stressed state of bodies with thermal cylindrical inclusions and cracks (plane deformation). *Materials Science*, 46 (3), 315–324. doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-010-9292-2>
13. Savruk, M. P. (1981). *Dvumernye zadachi uprugosti dlya tel s treschinami*. Kyiv: Naukova dumka, 324.
14. Erdogan, F., Gupta, G. D., Cook, T. S. (1973). Numerical solution of singular integral equations. *Methods of Analysis and Solutions of Crack Problems*, 368–425. doi: [https://doi.org/10.1007/978-94-017-2260-5\\_7](https://doi.org/10.1007/978-94-017-2260-5_7)
15. Panasyuk, V. V., Savruk, M. P., Dacyshin, A. P. (1976). *Raspredelenie napryazheniy okolo treschin v plastinakh i obolochkah*. Kyiv: Naukova Dumka, 442.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.246805

#### DETERMINATION OF FEATURES OF COMPOSITE STEEL AND CONCRETE SLAB BEHAVIOR UNDER FIRE CONDITION (p. 59–67)

**Valeria Nekora**

Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4354-4422>

**Stanislav Sidnei**

Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7664-6620>

**Taras Shnal**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4226-9513>

**Olga Nekora**

Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5202-3285>

**Iryna Dankevych**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9858-2322>

**Serhii Pozdieiev**

Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9085-0513>

Methods for calculating the fire resistance of steel-reinforced concrete slabs made using profiled steel sheets under the influence of a standard temperature regime for more than 120 minutes are considered and analyzed.

Research has been carried out to determine the heating parameters and the stress-strain state of steel-reinforced concrete slabs made using profiled steel sheets under fire conditions for more than 120 minutes. The results of this study allow to obtain indicators of temperature distribution for assessing the fire resistance of such structures for fire resistance classes above REI 120. Accordingly, the results obtained are a scientific basis for improving the existing method for calculating the fire resistance of steel-reinforced concrete slabs made using profiled steel sheets.

The temperature distribution in the cross-section of structures was obtained using a general theoretical approach to solving the problem of heat conduction using the finite element method. Using the obtained temperature distributions, the parameters of the stress-strain state were determined based on the method of limiting states.

To carry out the calculations, appropriate mathematical models were created that describe the effect of the standard temperature regime of a fire, to determine the temperature distribution at every minute in the sections of steel-reinforced concrete slabs with profiled steel sheets. A method is proposed for dividing the section into zones to take into account the decrease in the indicators of the mechanical properties of concrete and steel.

A simplified method for the design assessment of steel-reinforced concrete slabs made using profiled steel sheets is proposed, which is consistent with the current EU standards and can be effectively used to analyze their fire resistance when establishing their compliance with the fire resistance class REI 120 and higher.

**Keywords:** steel-reinforced concrete slabs, slab fire resistance, heat-insulating ability, stress-strain state, bearing capacity.

#### References

1. Voskobiynyk, O. P. (2014). *Stalezalobeton: nadiinist, tekhnichni stany, ryzyky*. Donetsk: Donbas, 394.
2. Johnson, R. P. (2018). *Composite Structures of Steel and Concrete: Beams, Slabs, Columns and Frames for Buildings*. John Wiley & Sons, Inc. doi: <https://doi.org/10.1002/9781119401353>
3. DBN V.1.1-7:2016. *Fire safety of construction. General requirements* (2017). Kyiv. Available at: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=68456](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=68456)
4. Zmaha, M. I., Pozdieiev, S. V., Zmaha, Y. V., Nekora, O. V., Sidnei, S. O. (2021). Research of the behavioral of the wooden beams with fire protection lining under fire loading. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1021 (1), 012031. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1021/1/012031>
5. Shnal, T., Pozdieiev, S., Nuianzin, O., Sidnei, S. (2020). Improvement of the Assessment Method for Fire Resistance of Steel Structures in the Temperature Regime of Fire under Realistic Conditions. *Materials Science Forum*, 1006, 107–116. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1006.107>
6. Pozdieiev, S., Nuianzin, O., Borsuk, O., Binetska, O., Shvydenko, A., Alimov, B. (2020). Temperature effect on the thermal-physical properties of fire-protective mineral wool cladding of steel structures under the conditions of fire resistance tests. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (12 (106)), 39–45. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.210710>
7. Roytman, V. M. (2001). *Inzhenernye resheniya po otsenke ognestoykosti proektiruemyh i rekonstruiruemyh zdaniy*. Moscow: *Pozharnaya bezopasnost' i nauka*, 382.
8. Dmitriev, I., Lyulikov, V., Bazhenova, O., Bayanov, D. (2019). Calculation of fire resistance of building structures in software packages. *E3S Web of Conferences*, 91, 02007. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199102007>
9. Lakhani, H., Kamath, P., Bhargava, P., Singh, T., Reddy, G. R. (2013). Simulation of Fire Resistance of Reinforced Concrete Structural Members. *Journal of Structural Engineering*, 40 (1), 7–11.
10. Pozdieiev, S., Nekora, O., Kryshal, T., Sidnei, S., Shvydenko, A. (2019). Improvement of the estimation method of the possibility of progressive destruction of buildings caused by fire. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 708 (1), 012067. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/708/1/012067>
11. Ding, R., Fan, S., Wu, M., Li, Y. (2021). Numerical study on fire resistance of rectangular section stainless steel-concrete composite

- beam. *Fire Safety Journal*, 125, 103436. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103436>
12. Sharma, S., Vaddamani, V. T., Agarwal, A. (2019). Insulation effect of the concrete slab-steel deck interface in fire conditions and its influence on the structural fire behavior of composite floor systems. *Fire Safety Journal*, 105, 79–91. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.02.006>
  13. Lennon, T., Mur, D. B., Van, Yu. K., Beyli, K. G. (2013). Rukovodstvo dlya proektirovshchikov k EN 1991-1-2:2002, EN 1992-1-2:2002, EN 1993-1-2:2002 i EN 1994-1-2:2002: spravochnik po proektirovaniyu protivopozharnoy zaschity stal'nyh, stalezhelezobetonnyh i betonnyh konstruktsiy zdaniy i sooruzheniy v sootvetstvii s Evrokodami. Moscow, 196.
  14. Džadić, S. (2018). Fire resistance of reinforced concrete slabs according to EC2 and branz TR8. *Савремена теорија и пракса у грађитељству*, 13 (1). doi: <https://doi.org/10.7251/stp1813562d>
  15. Nigro, E., Cefarelli, G., Bilotta, A., Manfredi, G., Cosenza, E. (2011). Fire resistance of concrete slabs reinforced with FRP bars. Part II: Experimental results and numerical simulations on the thermal field. *Composites Part B: Engineering*, 42 (6), 1751–1763. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.02.026>
  16. EN 1994-1-2. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: General rules - Structural fire design. Available at: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1994.1.2.2005.pdf>
  17. Xu, Q., Chen, L., Li, X., Han, C., Wang, Y. C., Zhang, Y. (2020). Comparative experimental study of fire resistance of two-way restrained and unrestrained precast concrete composite slabs. *Fire Safety Journal*, 118, 103225. doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103225>
  18. Concrete Reinforcing Steel Institute - CRSI [2015]. “Fire Resistance of Reinforced Concrete Buildings”, CRSI Technical Note ETN-B-1-16. Schaumburg, Illinois. Available at: [http://resources.crsi.org/index.cfm/\\_api/render/file/?method=inline&fileID=28E52FFB-B3FD-D0AE-88CEF9CC52E075B6](http://resources.crsi.org/index.cfm/_api/render/file/?method=inline&fileID=28E52FFB-B3FD-D0AE-88CEF9CC52E075B6)
  19. Workshop ‘Structural Fire Design of Buildings according to the Eurocodes’. Brussels.
  20. Balaji, A., Nagarajan, P., Madhavan Pillai, T. M. (2016). Predicting the response of reinforced concrete slab exposed to fire and validation with IS456 (2000) and Eurocode 2 (2004) provisions. *Alexandria Engineering Journal*, 55 (3), 2699–2707. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.06.005>
  21. Lim, L., Buchanan, A., Moss, P., Franssen, J.-M. (2004). Computer Modeling of Restrained Reinforced Concrete Slabs in Fire Conditions. *Journal of Structural Engineering*, 130 (12), 1964–1971. doi: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(2004\)130:12\(1964\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(2004)130:12(1964))
  22. Vassart, O., Zhao, B., Cajot, L. G., Robert, F., Meyer, U., Frangi, A. (2014). Eurocodes: Background & Applications Structural Fire Design. JRC Science and Policy Report. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 256. doi: <https://doi.org/10.2788/85432>
  23. Pozdeev, S. V. (2010). Issledovanie effektivnosti raschetnyh metodov dlya opredeleniya predela ognestoykosti prednapryazhennoy rebristoy zhelezobetonnoy plity. *Naukovyi visnyk Ukrainkoho naukovo-doslidnoho instytutu pozhezhnoi bezpeky*, 2 (24), 5–11.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.243866

**DEFINING PATTERNS IN THE DYNAMIC LOAD AND STRENGTH OF THE BEARING STRUCTURE OF A COVERED FREIGHT CAR WITH A FILLER IN THE GIRDER BEAM (p. 68–76)**

**Sergii Panchenko**

Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7626-9933>

**Oleksij Fomin**

State University of Infrastructure and Technologies, Kyiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2387-9946>

**Glib Vatulia**

Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3823-7201>

**Alyona Lovska**

Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8604-1764>

**Oleksandr Bahrov**

State Enterprise “Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute”, Kremenchuk, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8984-7595>

**Dmytro Fedosov-Nikonov**

State Enterprise “Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute”, Kremenchuk, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0781-8182>

**Andriy Rybin**

Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4430-8018>

This paper reports a study into determining the dynamic load and strength of the bearing structure of a covered freight car under operational modes. A feature of the freight car's bearing structure is that the girder beam has a closed cross-section. To reduce the dynamic load of the frame, the girder beam is filled with a material with viscoelastic properties. Such a solution could contribute to the transformation of the kinetic energy of impact (due to jerk, stretching, compression) into work of viscoelastic friction forces, and, consequently, to reducing the load on the bearing structure.

To substantiate the proposed improvement, the dynamic load on the bearing structure of a covered freight car was mathematically modeled. The calculation was performed for the case of joint impacts at shunting. The study was carried out in a flat coordinate system. It was established that the maximum accelerations acting on the bearing structure of a covered freight car were about 37 m/s<sup>2</sup>. The calculated acceleration value is 3.2 % lower than that obtained for the bearing structure of a covered freight car without filler.

The results of calculating the strength of the load-bearing structure of a covered freight car are given. In this case, a finite-element method was applied. The maximum equivalent stresses occur in the zones of interaction between the girder beam and the pivot beams, and amount to 319.5 MPa, which is 8 % lower than permissible. The calculation was also performed regarding other operational modes of loading the freight car's bearing structure.

The model of the dynamic load on the bearing structure of a covered freight car was verified according to the F-criterion.

The research reported here could contribute to designing innovative rolling stock structures, thereby improving the efficiency of their operation.

**Keywords:** transport mechanics, covered freight car, load-bearing structure, dynamic load, innovative freight car.

**References**

1. Soloviova, L., Strelko, O., Isaienko, S., Soloviova, O., Berdnychenko, Y. (2020). Container Transport System as a Means of Saving Resources. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 459, 052070. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/5/052070>



2. Strelko, O. H., Kyrychenko, H. I., Berdnychenko, Y. A., Sorochynska, O. L., Pylypchuk, Ya. O. (2019). Application of Information Technologies for Automation of Railway and Cargo Owner Interaction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 582, 012029. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/582/1/012029>
3. Bondarenko, V., Skurikhin, D., Wojciechowski, J. (2019). The Application of Lithium-Ion Batteries for Power Supply of Railway Passenger Cars and Key Approaches for System Development. *Smart and Green Solutions for Transport Systems*, 114–125. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-35543-2\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-35543-2_10)
4. Bondarenko, V. V., Skurikhin, D. I., Vizniak, R. I., Ravlyuk, V. H., Skurikhin, V. I. (2019). Experimental study of the method and device for wheel-sets acoustic monitoring of railway cars in motion. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 4, 30–36. doi: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-4/7>
5. Shi, H., Wang, L., Nicolsen, B., Shabana, A. A. (2017). Integration of geometry and analysis for the study of liquid sloshing in railroad vehicle dynamics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-Body Dynamics*, 231 (4), 608–629. doi: <https://doi.org/10.1177/1464419317696418>
6. Pospelov, B., Rybka, E., Meleshchenko, R., Borodych, P., Gornostal, S. (2019). Development of the method for rapid detection of hazardous atmospheric pollution of cities with the help of recurrence measures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1 (10 (97)), 29–35. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.155027>
7. Danchenko, Y., Andronov, V., Barabash, E., Obigenko, T., Rybka, E., Meleshchenko, R., Romin, A. (2017). Research of the intramolecular interactions and structure in epoxyamine composites with dispersed oxides. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (12 (90)), 4–12. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118565>
8. Otrosh, Y., Semkiv, O., Rybka, E., Kovalov, A. (2019). About need of calculations for the steel framework building in temperature influences conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 708, 012065. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/708/1/012065>
9. Chepurnoy, A. D., Litvinenko, A. V., Baranov, A. N., Sheychenko, R. I., Bondarenko, M. A. (2014). Eksperimental'nye issledovaniya gruzovogo vagona. *Visnyk NTU «KhPI»*, 22 (1065), 44–61.
10. Bityutskiy, A. A., Afanasyev, A. Ye., Khilov, I. A., Guskov, V. I. (2015). Bench run for resistance to fatigue of cobbled units of a covered wagon for car transportation. *Transport Rossiyskoy Federacii*, 3 (58), 81–85. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/15930830.pdf>
11. Antipin, D. Y., Racin, D. Y., Shorokhov, S. G. (2016). Justification of a Rational Design of the Pivot Center of the Open-top Wagon Frame by means of Computer Simulation. *Procedia Engineering*, 150, 150–154. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.738>
12. Sepe, R., Pozzi, A. (2015). Static and modal numerical analyses for the roof structure of a railway freight refrigerated car. *Frattura Ed Integrità Strutturale*, 9 (33), 451–462. doi: <https://doi.org/10.3221/igf-esis.33.50>
13. Lee, H.-A., Jung, S.-B., Jang, H.-H., Shin, D.-H., Lee, J. U., Kim, K. W., Park, G.-J. (2015). Structural-optimization-based design process for the body of a railway vehicle made from extruded aluminum panels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 230 (4), 1283–1296. doi: <https://doi.org/10.1177/0954409715593971>
14. Fomin, O., Gorbunov, M., Gerlici, J., Vatulja, G., Lovska, A., Kravchenko, K. (2021). Research into the Strength of an Open Wagon with Double Sidewalls Filled with Aluminium Foam. *Materials*, 14 (12), 3420. doi: <https://doi.org/10.3390/ma14123420>
15. Fomin, O., Gorbunov, M., Lovska, A., Gerlici, J., Kravchenko, K. (2021). Dynamics and Strength of Circular Tube Open Wagons with Aluminum Foam Filled Center Sills. *Materials*, 14 (8), 1915. doi: <https://doi.org/10.3390/ma14081915>
16. Sokolov, A. M., Savushkina, Yu. V., Novoselov, A. Yu., Korotkov, D. S. (2019). Universal'niy profil' dlya hrebtovoy balki vagonov. *Transport Rossiyskoy Federacii*, 1 (80), 50–55. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/universalnyy-profil-dlya-hrebtovoy-balki-vagonov>
17. Matsika, E., O'Neill, C., Grasso, M., De Iorio, A. (2016). Selection and ranking of the main beam geometry of a freight wagon for light-weighting. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 232 (2), 495–513. doi: <https://doi.org/10.1177/0954409716677075>
18. Hosseini-Tehrani, P., Bayat, V. (2011). Study on crashworthiness of wagon's frame under frontal impact. *International Journal of Crashworthiness*, 16 (1), 25–39. doi: <https://doi.org/10.1080/13588265.2010.499698>
19. Bogomaz, G. I., Mehov, D. D., Pilipchenko, O. P., Chernomashenceva, Yu. G. (1992). Nagruzhennost' konteynerov-cistern, raspolozhenykh na zheleznodorozhnoy platforme, pri udarah v avtoscepku. *Dynamika ta keruvannya rukhom mekhanichnykh system*. Kyiv: ANU, Instytut tekhnichnoi mekhaniky, 87–95.
20. DSTU 7598:2014. Freight Wagons. General requirements to calculation and designing of the new and modernized 1520 mm gauge wagons (non-self-propelled) (2015). Kyiv. Available at: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=73763](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=73763)
21. GOST 33211-2014. Freight wagons. Requirements to structural strength and dynamic qualities (2016). Moscow.
22. Normy dlya rascheta i proektirovaniya vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamohodnyh) (1996). Moscow: GosNIIV – VNIIZhT, 319.
23. Kir'yanov, D. V. (2006). Mathcad 13. Sankt-Peterburg: BHV-Peterburg, 608. Available at: [https://elprivod.nmu.org.ua/files/mathapps/%D0%9A%D0%B8%D1%80%D1%8C%D1%8F%D0%BD%D0%BE%D0%B2\\_mathcad\\_13.pdf](https://elprivod.nmu.org.ua/files/mathapps/%D0%9A%D0%B8%D1%80%D1%8C%D1%8F%D0%BD%D0%BE%D0%B2_mathcad_13.pdf)
24. D'yakonov, V. (2000). MATHCAD 8/2000: special'niy spravochnik. Sankt-Peterburg: Piter, 592.
25. Fomin, O., Lovska, A., Pishchak, V., Kučera, P. (2019). Dynamic load effect on the transportation safety of tank containers as part of combined trains on railway ferries. *Vibroengineering PROCEDIA*, 29, 124–129. doi: <https://doi.org/10.21595/vp.2019.21138>
26. Lovskaya, A. (2015). Computer simulation of wagon body bearing structure dynamics during transportation by train ferry. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (7 (75)), 9–14. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.43749>
27. Pospelov, B., Rybka, E., Togobytska, V., Meleshchenko, R., Danchenko, Y., Butenko, T. et al. (2019). Construction of the method for semi-adaptive threshold scaling transformation when computing recurrent plots. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (10 (100)), 22–29. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.176579>
28. Fomin, O. V. (2015). Improvement of upper bundling of side wall of gondola cars of 12-9745 model. *Metallurgical and Mining Industry*, 1, 45–48. Available at: [https://www.metalljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI\\_2015\\_1/9%20Fomin.pdf](https://www.metalljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2015_1/9%20Fomin.pdf)
29. Dudnyk, V., Sinenko, Y., Matsyk, M., Demchenko, Y., Zhyvotovskyi, R., Repilo, I. et al. (2020). Development of a method for training artificial neural networks for intelligent decision support systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (2 (105)), 37–47. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.203301>

30. Goolak, S., Gubarevych, O., Yermolenko, E., Slobodyanyuk, M., Gorobchenko, O. (2020). Mathematical modeling of an induction motor for vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (2 (104)), 25–34. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.199559>
31. Vatulia, G., Komagorova, S., Pavliuchenkov, M. (2018). Optimization of the truss beam. Verification of the calculation results. *MATEC Web of Conferences*, 230, 02037. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002037>
32. Gallager, R. (1984). *Metod konechnyh elementov. Osnovy*. Moscow: Mir, 428.
33. Lovska, A., Fomin, O. (2020). A new fastener to ensure the reliability of a passenger car body on a train ferry. *Acta Polytechnica*, 60 (6), 478–485. doi: <https://doi.org/10.14311/ap.2020.60.0478>
34. Aliyev, I., Thamer, K. A., Zhuravskiy, Y., Sova, O., Smirnova, N., Zhyvotovskiy, R. et. al. (2019). Development of a method of fuzzy evaluation of information and analytical support of strategic management. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (2 (102)), 16–27. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184394>
35. Koshlan, A., Salnikova, O., Chekhovska, M., Zhyvotovskiy, R., Prokopenko, Y., Hurskiy, T. et. al. (2019). Development of an algorithm for complex processing of geospatial data in the special-purpose geoinformation system in conditions of diversity and uncertainty of data. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (9 (101)), 35–45. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.180197>
36. Krol, O., Sokolov, V. (2020). Modeling of Spindle Node Dynamics Using the Spectral Analysis Method. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 35–44. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_4)
37. Krol, O., Porkuian, O., Sokolov, V., Tsankov, P. (2019). Vibration stability of spindle nodes in the zone of tool equipment optimal parameters. *Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences*, 72 (11), 1546–1556. doi: <https://doi.org/10.7546/crabs.2019.11.12>
38. EN 12663-2:2010. Railway applications - structural requirements of railway vehicle bodies - Part 2: Freight wagons (2010). B., 54.
39. Kobzar', A. I. (2006). *Prikladnaya matematicheskaya statistika*. Moscow: Fizmatlit, 816.
40. Ivchenko, G. I., Medvedev, Yu. I. (2014). *Matematicheskaya statistika*. Moscow: Librokom, 352.
41. Rudenko, V. M. (2012). *Matematychna statystyka*. Kyiv: Tsentr uchbovnoi literatury, 304.
42. Kosmin, V. V. (2007). *Osnovy nauchnyh issledovaniy*. Moscow: GOU «Uchebno-metodicheskiy centr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte», 271.
43. Alyamovskiy, A. A. (2007). *SolidWorks/COSMOSWorks 2006–2007. Inzhenernyy analiz metodom konechnyh elementov*. Moscow: DMK, 784.
44. Alyamovskiy, A. A. (2010). *COSMOSWorks. Osnovy rascheta konstrukciy na prochnost' v srede SolidWorks*. Moscow: DMK, 784.
45. Pištěk, V., Kučera, P., Fomin, O., Lovska, A. (2020). Effective Mistuning Identification Method of Integrated Bladed Discs of Marine Engine Turbochargers. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8 (5), 379. doi: <https://doi.org/10.3390/jmse8050379>
46. Vatulia, G., Rezenenko, M., Orel, Y., Petrenko, D. (2017). Regression equations for circular CFST columns carrying capacity evaluation. *MATEC Web of Conferences*, 107, 00051. doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710700051>
47. Nandan, S., Trivedi, R., Kant, S., Ahmad, J., Maniraj, M. (2020). Design, analysis and prototype development of railway wagons on different loading conditions. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 04 (10), 122–129. doi: <https://doi.org/10.33564/ijeast.2020.v04i10.023>
48. Fomin, O., Lovska, A. (2020). Establishing patterns in determining the dynamics and strength of a covered freight car, which exhausted its resource. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (7 (108)), 21–29. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217162>
49. Płaczek, M., Wróbel, A., Buchacz, A. (2016). A concept of technology for freight wagons modernization. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 161, 012107. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/161/1/012107>
50. Harak, S. S., Sharma, S. C., Harsha, S. P. (2014). Structural Dynamic Analysis of Freight Railway Wagon Using Finite Element Method. *Procedia Materials Science*, 6, 1891–1898. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.221>

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.247526

**USING THE ASYMPTOTIC APPROXIMATION OF THE MAXWELL ELEMENT MODEL FOR THE ANALYSIS OF STRESS IN A CONVEYOR BELT (p. 77–84)**

**Oleh Pihnastyi**

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5424-9843>

**Svitlana Cherniavska**

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
Kharkiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9438-6965>

The features of the propagation of dynamic stresses in a conveyor belt, the material properties of which correspond to the Maxwell element model, are considered. Analytical expressions are presented for calculating the dynamic elastic modulus, the loss modulus, and the angle of mechanical loss depending on the frequency of longitudinal oscillations in the belt of an extended transport conveyor. To analyze the dynamic stress propagation process, dimensionless parameters are introduced that characterize the specific features of the viscoelastic process in a conveyor belt, the material properties of which correspond to the Maxwell element model. The transition to the dimensionless Maxwell element model is made and the analysis of the relationship between stress and deformation of a conveyor belt element for extremely large and small values of dimensionless parameters is made. The substantiation of the scope of the Maxwell element model is given. It is shown that at sufficiently high frequencies of longitudinal stress oscillations in a conveyor belt, at which the oscillation period is much less than the characteristic oscillation decay time, the relationship between stress and deformation of the conveyor belt element corresponds to Hooke's law. A qualitative analysis of the relaxation time was carried out for a conveyor belt material, the properties of which correspond to the Maxwell element model. The analysis of the propagation of dynamic stresses in the conveyor belt for the characteristic operating modes of the transport conveyor is carried out. The conveyor operating mode with a constant deformation rate of the belt element; the mode in which a constant load is suddenly applied to the belt element; the conveyor operating mode with an instantly applied load to the belt element were investigated. It was determined that in cases where the characteristic process time significantly exceeds the stress relaxation time in the conveyor belt or the longitudinal oscillation period is much less than the stress relaxation time in the conveyor

belt, the Maxwell element model can be replaced with a sufficient degree of accuracy by the Hooke element model.

**Keywords:** viscoelastic process, Maxwell element, Hooke element, transport conveyor, dynamic elastic modulus.

### References

- Zeng, F., Yan, C., Wu, Q., Wang, T. (2020). Dynamic Behaviour of a Conveyor Belt Considering Non-Uniform Bulk Material Distribution for Speed Control. *Applied Sciences*, 10 (13), 4436. doi: <https://doi.org/10.3390/app10134436>
- Yao, Y., Zhang, B. (2020). Influence of the elastic modulus of a conveyor belt on the power allocation of multi-drive conveyors. *PLOS ONE*, 15 (7), e0235768. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235768>
- Woźniak, D. (2020). Laboratory tests of indentation rolling resistance of conveyor belts. *Measurement*, 150, 107065. doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107065>
- Blazej, R., Jurdzia, L., Kirjanow-Blazej, A., Kozłowski, T. (2021). Identification of damage development in the core of steel cord belts with the diagnostic system. *Scientific Reports*, 11 (1). doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91538-z>
- Sakharwade, S. G., Nagpal, S. (2019). Analysis of Transient Belt Stretch for Horizontal and Inclined Belt Conveyor System. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 4 (5), 1169–1179. doi: <https://doi.org/10.33889/ijmms.2019.4.5-092>
- Manjgo, M., Piric, E., Vuherer, T., Burzic, M. (2018). Determination of mechanical properties of composite materials-the rubber conveyor belt with cartridges made of polyester and polyamide. *ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering*, 16 (1), 141–144. Available at: <http://annals.fih.upt.ro/pdf-full/2018/ANNALS-2018-1-22.pdf>
- Ferry, J. (1980). *Viscoelastic Properties of Polymers*. Wiley, 672.
- Pihnastyi, O. M. (2019). Control of the belt speed at unbalanced loading of the conveyor. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 122–129. doi: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-6/18>
- Yang, G. (2014). Dynamics analysis and modeling of rubber belt in large mine belt conveyors. *Sensors & Transducers*, 181 (10), 210–218. Available at: [https://www.sensorsportal.com/HTML/DIGEST/P\\_2492.htm](https://www.sensorsportal.com/HTML/DIGEST/P_2492.htm)
- Nordell, L., Ciozda, Z. (1984). Transient belt stresses during starting and stopping: elastic response simulated by finite element methods. *Bulk Solids Handling*, 4 (1), 93–98. Available at: <http://www.ckit.co.za/secure/conveyor/papers/troughed/transient/transient-belt-stresses.htm>
- Kulinowski, P. (2014). Simulation method of designing and selecting tensioning systems for mining belt conveyors. *Archives of Mining Sciences*, 59 (1), 123–138. doi: <https://doi.org/10.2478/amsc-2014-0009>
- Pihnastyi, O., Khodusov, V. (2020). Hydrodynamic model of transport system. *East European Journal of Physics*, 1, 121–136. doi: <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2020-1-11>
- Lu, Y., Lin, F.-Y., Wang, Y.-C. (2015). Investigation on Influence of Speed on Rolling Resistance of Belt Conveyor Based on Viscoelastic Properties. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 45 (3), 53–68. doi: <https://doi.org/10.1515/jtam-2015-0017>
- Rudolphi, T. J., Reicks, A. V. (2006). Viscoelastic Indentation and Resistance to Motion of Conveyor Belts Using a Generalized Maxwell Model of the Backing Material. *Rubber Chemistry and Technology*, 79 (2), 307–319. doi: <https://doi.org/10.5254/1.3547939>
- Pihnastyi, O. M., Cherniavska, S. M. (2021). Analysis of stress in the conveyor belt (Maxwell–element model). *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 4, 74–81. doi: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-4/074>
- He, D., Pang, Y., Lodewijks, G. (2016). Determination of Acceleration for Belt Conveyor Speed Control in Transient Operation. *International Journal of Engineering and Technology*, 8 (3), 206–211. doi: <https://doi.org/10.7763/ijet.2016.v8.886>
- Pascual, R., Meruane, V., Barrientos, G. (2005). Analysis of transient loads on cable-reinforced conveyor belts with damping consideration. *XXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*, CIL0620, 1–15. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.494.34&rep=rep1&type=pdf>

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.246751

DETERMINING THE FEATURES OF OSCILLATIONS IN PRESTRESSED PIPELINES (p. 85–92)

**Ulanbator Suleimenov**

Mukhtar Auezov South Kazakhstan University,  
Shymkent, Republic of Kazakhstan  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7798-1044>

**Nurlan Zhangabay**

Mukhtar Auezov South Kazakhstan University,  
Shymkent, Republic of Kazakhstan  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8153-1449>

**Akmaral Utelbayeva**

Mukhtar Auezov South Kazakhstan University,  
Shymkent, Republic of Kazakhstan  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4771-9835>

**Mohamad Nasir Mohamad Ibrahim**

Universiti Sains Malaysia, Penang, Malaysia  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6784-5775>

**Arman Moldagaliyev**

Mukhtar Auezov South Kazakhstan University,  
Shymkent, Republic of Kazakhstan  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4286-8401>

**Khassen Abshenov**

Mukhtar Auezov South Kazakhstan University,  
Shymkent, Republic of Kazakhstan  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0173-2524>

**Svetlana Buganova**

International Education Corporation,  
Almaty, Republic of Kazakhstan  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2005-3305>

**Saltanat Daurbekova**

International Education Corporation,  
Almaty, Republic of Kazakhstan  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2353-8930>

**Zaure Ibragimova**

Mukhtar Auezov South Kazakhstan University,  
Shymkent, Republic of Kazakhstan  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7176-8186>

**Aibarsha Dosmakanbetova**

Mukhtar Auezov South Kazakhstan University,  
Shymkent, Republic of Kazakhstan  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9385-6267>

This paper considers the structural solution for a main above-ground pipeline with a pre-stressed winding, which makes it

possible to improve the efficiency of operation and reduce material consumption. The results from studying experimentally the features in the operation of prestressed pipelines under static operating loads are given. It is shown that the radial movements of the wall of a pre-stressed pipeline are constrained by the strained winding, which prevents its deformation. It was revealed that increasing the tension force of the winding wire reduces circular stresses in the pipeline wall by 1.3...1.6 times and increases meridional ones by 1.2...1.4 times.

The experimental study into the models of prestressed pipelines with free vertical and horizontal oscillations has established the dependence of frequency characteristics on the operating conditions and pre-stress parameters. It was found that the envelope amplitude on the oscillogram of free attenuated oscillations takes the shape of an exponent, which indicates the damping effect of the pre-stress. Analysis of the change in the dynamic characteristics of the models depending on the pre-stress force has revealed that the frequencies of free oscillations increase by 1.5÷1.6 times while the oscillation decrement decreases by 1.2÷1.25 times.

This paper reports the results of studying the influence of pre-stress parameters on the stressed-strained state of the pipeline model under forced horizontal and vertical oscillations.

It is shown that the diagrams of circular dynamic stresses and deformations in the models of a prestressed pipeline are smoother compared to similar characteristics of a conventional pipeline tested at the same experimental parameters.

The study results have made it possible to quantify the features in the operation of a pre-stressed pipeline under static and dynamic influences, taking into consideration the pre-stress parameters and operating conditions.

**Keywords:** pre-stressed pipeline, winding wire, experimental analysis of oscillations, free attenuating oscillations, forced vibration.

## References

- V Komi proizoshel razryv truby na gazoprovode. Available at: <https://ria.ru/20190728/1556950300.html>
- Gaysina, D. R., Denisova, YA. V. (2016). Analiz prichin avariynykh situatsiy na magistral'nyh truboprovodah. Vestnik tekhnologicheskogo universiteta, 19 (14), 129–130. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26555576>
- Mokrousov, V. I. (2015). K voprosu ob avariayah magistral'nykh nefteprovodov. Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk, 11-1, 175–180. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24901722>
- Rybina, M. A. (2016). Prestressed tank. VIII Mezhdunarodnaya studencheskaya nauchnaya konferentsiya. Studencheskiy nauchny forum - 2016. Available at: <https://files.scienceforum.ru/pdf/2016/18294.pdf>
- Rabota i raschet predvaritel'no-napryazhennykh tsilindricheskikh obolochek. Available at: <http://ctcmetar.ru/metallicheskie-konstrukcii/1709-rabota-i-raschet-predvaritelno-napryazhennykh-cilindricheskikh-obolochek.html>
- Fiori, S. R., Kendall, D. R., Mulligan, S. B. (2001). Rehabilitation of Prestressed Concrete Cylinder Pipe – A Utility Perspective. Pipelines 2001. doi: [https://doi.org/10.1061/40574\(2001\)35](https://doi.org/10.1061/40574(2001)35)
- Dijkstra, G. J., Francis, B., Van Der Heden, H., Gresnigt, A. M. (2011). Industrial Steel pipe systems under seismic loading: A comparison of European and American design codes. 3rd International Conferences on Computational Methods in structural Dynamics and Earthquake Engineering, 1–22. Available at: <https://research.tudelft.nl/en/publications/industrial-steel-pipe-systems-under-seismic-loading-a-comparison->
- Amanbaev, T., Suleymenov, U., Shupakova, R., Zhanabay, N. (2007). Inzhenernyy raschet i metodologiya optimal'nogo proektirovaniya predvaritel'no napryazhennykh truboprovodov. Mekhanika i modelirovaniye protsessov, 2, 191–195.
- Fedorova, T. G. (2018). Experimental and theoretical study of elastoplastic deformation, loss of stability and postbuckling behavior of cylindrical shells with discrete aggregate during bending. Cheboksary: PH "Sreda", 184. doi: <https://doi.org/10.31483/a-38>
- Romanov, D. A., Rashchepkina, S. A. (2014). Experimental and theoretical research cylindrical shell of hollow cells. X mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "bezopasnost' yadernoy energetiki". Posvyaschaetsya 60-letiyu yadernoy energetiki, 33–35. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22689385>
- Lupin, V. A., Pashkov, Y. I., Ivanov, M. A. (2012). Problems of the avalanche destructions of welded pipelines and methods of their prevention. Vestnik YuUrGU, 15, 26–27. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17742281>
- Alavinasab, A., Padewski, III, E., Holley, M., Jha, R., Ahmadi, G. (2010). Damage Identification Based on Vibration Response of Prestressed Concrete Pipes. Pipelines 2010. doi: [https://doi.org/10.1061/41138\(386\)87](https://doi.org/10.1061/41138(386)87)
- Bakhtiari-Nejad, F., Mousavi Bideleh, S. M. (2012). Nonlinear free vibration analysis of prestressed circular cylindrical shells on the Winkler/Pasternak foundation. Thin-Walled Structures, 53, 26–39. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2011.12.015>
- Zhang, Y. L., Gorman, D. G., Reese, J. M. (2003). Vibration of prestressed thin cylindrical shells conveying fluid. Thin-Walled Structures, 41 (12), 1103–1127. doi: [https://doi.org/10.1016/s0263-8231\(03\)00108-3](https://doi.org/10.1016/s0263-8231(03)00108-3)
- Gekhman, A. S., Zaynetdinov, H. H. (1988). Raschet, konstruirovaniye i ekspluatatsiya truboprovodov v seismicheskikh rayonah. Nadezhnost' i kachestvo, 180. Available at: <https://search.rsl.ru/record/01001429046>
- Brandt, M. J., Johnson, K. M., Elphinston, A. J., Ratnayaka, D. D. (2017). Pipeline Design and Construction. Twort's Water Supply, 693–742. doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100025-0.00017-x>
- Chen, M., Li, N., Mu, H. (2021) Assessment of a low-carbon natural gas storage network using the FLP model: A case study within China–Russia natural gas pipeline East Line's coverage. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 96, 104246. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104246>
- Singh, R. (2017). Hazards and Threats to a Pipeline System. Pipeline Integrity Handbook, 35–88. doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-813045-2.00005-3>
- Zhangabay, N. Zh., Utebayeva, A. B. (2021). Pat. No. 6208 KZ. Cylindrical shell for storage and transportation of liquids and hydrocarbons. No. 2021/0060.2; declared: 22.01.2021; published: 02.07.2021, Bul. No. 26. Available at: <https://gosreestr.kazpatent.kz/Utilitymodel/DownloadFilePdf?patentId=336625&lang=en>

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.246852

## THE PROBLEM OF HYDRAULIC CALCULATION OF PRESSURE DISTRIBUTION PIPELINES (p. 93–103)

**Volodymyr Cherniuk**

The John Paul II Catholic University of Lublin, Lublin, Poland

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7913-579X>

**Roman Hnativ**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4931-7493>



**Oleksandr Kravchuk**

Kyiv National University of Construction and Architecture,  
Kyiv, Ukraine

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-6578-8896>

**Vadym Orel**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3518-4597>

**Iryna Bihun**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7611-8097>

**Matvii Cherniuk**

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-6228-151X>

Most production technologies require a uniform flow path of liquid from pressure distribution pipelines. To achieve this goal, it is proposed to introduce polymer additives into the liquid flow or to use converging distribution pipelines with a continuous longitudinal slot in the wall. To reduce the uneven operation of the distribution pipeline during discrete liquid dispensing, it is proposed to use cylindrical output rotary nozzles with a lateral orthogonal entry of the jet into the nozzle. The problem is the lack of methods for accurate hydraulic calculation of the operation of distribution pipelines. Adequate calculation methods are based on differential equations.

Finding the exact solution of the differential equation of fluid motion with variable path flow rate for perforated distribution pipelines is urgent, because it still does not exist. The available calculation methods take into account only the right angles of separation of the jets from the flow in the distribution pipeline. These methods are based on the assumption that the coefficient of hydraulic friction and the coefficient of resistance of the outlets are constant along the flow. A calculation method is proposed that takes into account the change in the values of these resistance coefficients along the distribution pipeline. The kinematic and physical characteristics of the flow outside the distribution pipeline are also taken into account. The accuracy of calculating the value of the flow rate of water distributed from the distribution pipeline has been experimentally verified. The error in calculating the water consumption by the method assuming that the values of the resistance coefficients are unchanged along the distribution pipeline reaches 18.75 %. According to the proposed calculation method, this error does not exceed 6.25 %. However, both methods are suitable for the design of pressure distribution pipelines, provided that the jet separation angles are straight.

Taking into account the change from 90° to 360° of the angle of separation of the jets from the flow in the distribution pipeline will expand the scope and accuracy of calculation methods.

**Keywords:** pressure distribution pipeline, pressure flow of liquid with variable travel flow.

**References**

1. Yakhno, O. M., Cherniuk, V. V., Hnativ, R. M. (2016). *Napirni potoky zi zminnymy kharakterystykamy*. Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki, 408.
2. Bosak, N., Cherniuk, V., Matlai, I., Bihun, I. (2019). Studying the mutual interaction of hydraulic characteristics of waterdistributing pipelines and their spraying devices in the coolers at energy units. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (8 (99)), 23–29. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.166309>
3. Petrov, G. A. (1964). *Gidravlika peremennoy massy (Dvizhenie zhidkosti s izmeneniem raskhoda vdol' puti)*. Kharkiv: Har'kovskiy gosudarstvenniy universitet, 224.
4. Liu, H., Zong, Q., Lv, H., Jin, J. (2017). Analytical equation for outflow along the flow in a perforated fluid distribution pipe. *PLOS ONE*, 12 (10), e0185842. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185842>
5. Smyslov, V. V., Konstantinov, Yu. M. (1971). K raschyotu dyrchatykh trub s razdachey raskhoda vdol' puti. *Gidravlika i gidrotekhnika*, 12, 47–52.
6. Naumenko, I. I. (1980). *Gidravlicheskiy raschet polivnykh truboprovodov kapel'nogo orosheniya*. *Gidravlika i gidrotekhnika*, 30, 70–77.
7. Kovalenko, V. N., Boyko, V. I. (1989). Ob uravnenii ustanovivshegosya napornogo dvizheniya zhidkosti v tsilindricheskoy trube s otdeleniem raskhoda vdol' puti. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arhitektura*, 4, 84–87.
8. Kravchuk, A. M., Kravchuk, O. Ya. (2015). Do metodyky hidravlichnoho rozrakhunku napirnykh perforovanykh rozpodilchykh truboprovodiv system vodopostachannia ta vodovidvedennia. *Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliky*, 25, 117–124. Available at: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/PVVG\\_2015\\_25\\_20](http://nbuv.gov.ua/UJRN/PVVG_2015_25_20)
9. Claudio, D. (1962). I condotti emungenti da in serbatoio. *Confronto fra risultati teorici sperimentali atti e men. Accad. patav. scillettere ed arti*, 74 (2), 188–197.
10. Berlamont, J., Van der Beken, A. (1973). Solutions for Lateral Outflow in Perforated Conduits. *Journal of the Hydraulics Division*, 99 (9), 1531–1549. doi: <https://doi.org/10.1061/jycej.0003744>
11. Povkh, I. L., Cherniuk, V. V. (1989). Resistance of converging sections during the turbulent flow of water with polyacrylamide additives. *Journal of Engineering Physics*, 57 (5), 1267–1270. doi: <https://doi.org/10.1007/bf00871258>
12. Chen, A., Sparrow, E. M. (2009). Turbulence modeling for flow in a distribution manifold. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52 (5-6), 1573–1581. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.08.006>
13. Chen, A. W., Sparrow, E. M. (2009). Effect of exit-port geometry on the performance of a flow distribution manifold. *Applied Thermal Engineering*, 29 (13), 2689–2692. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.12.035>
14. Hassan, J. M., Mohamed, T. A., Mohammed, W. S., Alawee, W. H. (2014). Modeling the Uniformity of Manifold with Various Configurations. *Journal of Fluids*, 2014, 1–8. doi: <https://doi.org/10.1155/2014/325259>
15. Zemlyanaya, N. V., Gulyakin, A. V. (2017). Analysis of Causes of Non-Uniform Flow Distribution in Manifold Systems with Variable Flow Rate along Length. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 262, 012098. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/262/1/012098>
16. Lee, S., Moon, N., Lee, J. (2012). A study on the exit flow characteristics determined by the orifice configuration of multi-perforated tubes. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26 (9), 2751–2758. doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-012-0721-z>
17. Abubakar, S. S. (1977). *Factors Affecting orifice Discharge in a Multi-outlet irrigation pipe*. Manhattan, Kansas, 84. Available at: <https://krex.k-state.edu/dspace/bitstream/handle/2097/26998/LD2668T41979A28.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
18. Cherniuk, V. V., Ivaniv, V. V. (2016). Pat. No. 115840 UA. Sposib reholivannia shliakhovoi vytraty ridyny v truboprovodakh z nasadkami. No. a201611498; declared: 14.11.2016; published: 26.12.2017, Bul. No. 24. Available at: <https://uapatents.com/6-115840-sposib-regulyuvannya-shlyakhovo-vitrati-ridini-v-truboprovodakh-z-nasadkami.html>
19. Wang, C.-C., Yang, K.-S., Tsai, J.-S., Chen, I. Y. (2011). Characteristics of flow distribution in compact parallel flow heat exchangers, part II: Modified inlet header. *Applied Thermal Engineering*,

- 31 (16), 3235–3242. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.06.003>
20. Kim, N.-H., Byun, H.-W. (2013). Effect of inlet configuration on upward branching of two-phase refrigerant in a parallel flow heat exchanger. *International Journal of Refrigeration*, 36 (3), 1062–1077. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2012.12.001>
21. Zeng, D., Pan, M., Tang, Y. (2012). Qualitative investigation on effects of manifold shape on methanol steam reforming for hydrogen production. *Renewable Energy*, 39 (1), 313–322. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.08.027>
22. Wang, P., Pan, W., Dai, G. (2020). A CFD-based design scheme for the perforated distributor with the control of radial flow. *AIChE Journal*, 66 (5). doi: <https://doi.org/10.1002/aic.16901>
23. García-Guendulain, J. M., Riesco-Ávila, J. M., Picón-Núñez, M. (2020). Reducing thermal imbalances and flow nonuniformity in solar collectors through the selection of free flow area ratio. *Energy*, 194, 116897. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116897>
24. Singh, R. K., Rao, A. R. (2011). Fluid flow behavior and distribution in perforated tubes. *Transactions, SMiRT*, 21, 6–11. Available at: <https://repository.lib.ncsu.edu/bitstream/handle/1840.20/32672/p365.pdf?sequence=1>
25. Chernuk, V. V. (2008). Method of calculation of head power distributed conduit pipes. *Applied hydromechanics*, 10 (82 (3)), 65–76. Available at: [http://hydromech.org.ua/content/en/ph/10\\_3\\_65-76.html](http://hydromech.org.ua/content/en/ph/10_3_65-76.html)
26. Stepanov, M. P., Ovcharenko, I. H., Skobel'tsyn, Yu. A. (1984). *Spravochnik po gidravlike dlya melioratorov*. Moscow: Kolos, 207.
27. Chernyuk, V. V., Orel, V. I. (2009). Experimental Verification of a New Method of Calculation for Pressure Distributive Pipelines. *Zeszyt Naukowy Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, 266 (54), 27–34. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/321052315\\_Experimental\\_Verification\\_of\\_a\\_New\\_Method\\_of\\_Calculation\\_for\\_Pressure\\_Distributive\\_Pipelines](https://www.researchgate.net/publication/321052315_Experimental_Verification_of_a_New_Method_of_Calculation_for_Pressure_Distributive_Pipelines)
28. Cherniuk, V. V., Ivaniv, V. V., Bihun, I. V., Wojtowicz, J. M. (2019). Coefficient of Flow Rate of Inlet Cylindrical Nozzles with Lateral Orthogonal Inflow. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 50–57. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_7)
29. Ivaniv, V., Cherniuk, V., Kochkodan, V. (2020). Non-uniformity of Water Inflow into Pressure Collector-Pipeline Depending on the Values of Reynolds Criterion and of Inflow Jets Angles. *Proceedings of EcoComfort 2020*, 142–149. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_18)
30. Kravchuk, A. M., Chernyshev, D. O., Kravchuk, O. A. (2021). Hidravlika napirnykh perforovanykh truboprovodiv ochysnykh sporud system vodopostachannia ta vodovidvedennia. Kyiv: Kyivskiy nationalnyi universytet budivnytstva y arkhitektury, 207.
31. Kravchuk, A., Kochetov, G., Kravchuk, O. (2020). Improving the calculation of collecting perforated pipelines for water treatment structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (10 (108)), 23–28. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.216366>
32. Polyakov, V., Kravchuk, A., Kochetov, G., Kravchuk, O. (2019). Clarification of aqueous suspensions with a high content of suspended solids in rapid sand filters. *EUREKA: Physics and Engineering*, 1, 28–45. doi: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00827>
33. Cherniuk, V., Ivaniv, V. (2017). Influence of Values of Angle of Jet-joining on Non-uniformity of Water Inflow Along the Path in Pressure Collector-Pipeline. *Proceedings of 10th International Conference «Environmental Engineering»*. doi: <https://doi.org/10.3846/enviro.2017.073>

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.245121

**КОНСТРУЮВАННЯ ЗОВНІШНЬОГО ЗУБЧАСТОГО ЗАЧЕПЛЕННЯ, У ЯКОГО ЗУБЦІ КОЛІС ОКРЕСЛЕНІ ДУГАМИ ЛОГАРИФМІЧНОЇ СПІРАЛІ (с. 6–11)**

С. Ф. Пилипака, Т. А. Кресан, Т. М. Воліна, І. Ю. Грищенко, Л. В. Пшенична, О. В. Таценко

Зубчасті передачі є найпоширенішими механічними передачами у машинобудуванні, що мають високу надійність та довговічність роботи, стає передаточне число, можуть передавати великий крутний момент. При роботі зубчастої передачі відбувається ковзання поверхонь зубців, що призводить до виникнення сил тертя і зносу робочих поверхонь. Щоб запобігти цьому, поверхні зубців потребують постійного змащування. Розглянуто конструювання зубчастого зачеплення, у якого відсутнє тертя між поверхнями зубців, оскільки вони перекочуються один по одному без ковзання. Профіль зубця такої передачі окреслено конгруентними дугами, симетричними відносно прямої, яка сполучає центр обертання зубчастого колеса із вершиною зубця. Ці симетричні криві у вершині зубця перетинаються під заданим кутом. У впадинах колеса сусідні зубці теж перетинаються під цим же кутом. Забезпечити таку умову може крива, яка у всіх своїх точках перетинає радіус-вектор, що виходить з початку координат, теж під сталим кутом, рівним половині заданого. Такою кривою є логарифмічна спіраль. Якщо число зубців ведучого і веденого коліс однакове, то їх зубці будуть конгруентними. У протилежному випадку профілі зубців будуть відрізнятися, але вони будуть окреслені конгруентними дугами однієї і тієї ж логарифмічної спіралі однакової довжини, взятих з різних ділянок кривої.

Мінімально можливий кут при вершині зубців є прямим. При гострому кутові робота передачі є неможливою. Для побудови зубчастих коліс із прямим кутом при вершині зубця достатньо задати число зубців ведучого і веденого коліс. Міжцентрова відстань розраховується за знайденою формулою. Передаточне число такої передачі є змінним, однак при збільшенні числа зубців діапазон його зміни зменшується. Наведено алгоритм побудови коліс.

**Ключові слова:** зубчаста передача, логарифмічна спіраль, кочення поверхонь, міжцентрова відстань, довжина дуги.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.246533

**МЕТОД АНАЛІТИЧНОГО ОПИСУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧОГО ПРОСТОРУ МАНІПУЛЯЦІЙНОГО РОБОТА (с. 12–20)**

Akambay Beisembayev, Anargul Yerbosynova, Petro Pavlenko, Mukhit Baibatshayev

Розроблено метод аналітичного опису робочих просторів маніпуляційних роботів у вигляді логічної функції. Під робочим простором розуміється робоча зона чи зона досяжності маніпуляційного робота. Розглянуто приклад опису робочого простору маніпуляційного робота, що має сім обертальних ступенів рухливості.

Технологічні процеси в роботизованих виробництвах можуть бути пов'язані з позиціонуванням схвата, в необхідних точках, із заданими координатами або з виконанням руху робочого органу вздовж заданих траєкторій, які також можна визначити за допомогою необхідних точок із заданими координатами. Необхідною умовою виконання маніпуляційним роботом заданого процесу є умова охоплення робочим простором усіх необхідних точок позиціонування.

Для вирішення цієї проблеми запропоновано метод, в якому використовується аналіз кінематичної схеми маніпуляційного робота, для отримання графічного зображення робочого простору з метою виявлення граничних поверхонь, а також визначення додаткових поверхонь. Робочий простір обмежується безліччю граничних поверхонь, додаткові поверхні необхідні для виділення частин робочого простору. Задаючи кожену поверхню логічною функцією, описують робочий простір частинами. Далі отримані частини об'єднують логічним виразом, що представляє собою диз'юнктивну нормальну форму логічних функцій, що є аналітичним описом робочого простору.

Перевірку відповідності отриманого аналітичного опису вихідному графічному образу робочого простору виконують моделюванням диз'юнктивної нормальної форми логічних функцій в MatLab (США).

**Ключові слова:** маніпуляційний робот, межа робочого простору, елементарна поверхня, логічна функція.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.245591

**АНАЛІТИЧНЕ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ДИНАМІЧНОГО СИНТЕЗУ ШЕСТИЛАНКОВОГО ПРЯМОЛІНІЙНО-НАПРАВЛЯЮЧОГО ПЕРЕТВОРЮЮЧОГО МЕХАНІЗМУ ШТАНГОВОЇ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ (с. 21–28)**

Ayaulym Rakhmatulina, Nurbibi Imanbayeva, Sayat Ibrayev, Assemgul Uderbayeva, Aiman Nurmaganbetova

В роботі представлено аналітичне вирішення задачі оптимального динамічного балансування шестиланкового перетворюючого механізму штангової насосної установки. Дана задача вирішується чисельно з використанням комп'ютерної моделі динаміки, а саме шляхом підбору значення поправочного коефіцієнта  $k$ . Розглянуто аналітичний метод вирішення цієї задачі, тобто знайдене розташування противаги на третій ланці шестиланкового перетворюючого механізму для балансування. Для вирішення задачі використан принцип можливих переміщень і напишемо рівняння, в якому виразимо крутний момент через невідомий параметр

противаги. Далі знайдено таке значення невідомого параметра, при якому досягається мінімум середньоквадратичного значення крутного моменту  $M$ . З умови мінімуму функції отримано рівняння для визначення положення противаги. Таким чином, отримано аналітичне рішення задачі оптимального динамічного балансування шестиланкового перетворюючого механізму штангової насосної установки в різних умовах.

За результатами встановлено, що при комбінованому способі балансування значення максимального крутного моменту  $M$  і максимальної потужності знижуються на 20 %, ніж при розміщенні противаги на третій ланці перетворюючого механізму, а також при визначенні значення максимального крутного моменту через поправочний коефіцієнт  $k$ .

На практиці балансування здійснюють емпірично шляхом порівняння двох пікових значень крутного моменту  $M$  на колінчастому валу за цикл руху механізму. Вирішення аналітичної задачі дозволяє визначити точне положення противаги.

**Ключові слова:** штангова насосна установка, перетворюючий механізм, балансир, оптимальне балансування, динамічний синтез.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.247500

## ПОВЕДІНКА РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ ТЕОРІЇ ПРУЖНОСТІ ДЛЯ РАДІАЛЬНО-НЕОДНОРІДНОГО ЦИЛІНДРА МАЛОЇ ТОВЩИНИ (с. 29–42)

Natik Akhmedov, Sevda Akbarova

Вивчається неосесиметричне завдання теорії пружності для радіально-неоднорідного циліндра малої товщини. Передбачається, що модулями пружності є довільні позитивні шматково-безперервні функції змінної радіусу.

За допомогою методу асимптотичного інтегрування рівнянь теорії пружності, що базується на трьох ітераційних процесах, проведено якісний аналіз напружено-деформованого стану радіально-неоднорідного циліндра. На основі першого ітераційного процесу методу асимптотичного інтегрування рівнянь теорії пружності побудовано приватні рішення рівнянь рівноваги, у разі коли на бічній поверхні циліндра задано гладке навантаження. Проведено алгоритм побудови приватних розв'язків рівнянь рівноваги для спеціальних видів навантажень, бокова поверхня яких навантажена силами, що поліноміально залежать від осової координати.

Побудовані однорідні рішення, тобто будь-які рішення рівнянь рівноваги, які задовольняють умові відсутності напруги на бічних поверхнях. Показано, що однорідні рішення складаються із трьох типів: проникаючого рішення, рішень типу простого крайового ефекту та рішень прикордонного шару. Встановлено характер напружено-деформованого стану. Отримано, що проникаюче рішення та рішення, що мають характер крайового ефекту, визначають внутрішній напружено-деформований стан радіально-неоднорідного циліндра. Рішення, що мають характер прикордонного шару, локалізовані у торців циліндра та при віддаленні від торців експонентно зменшуються. Ці рішення відсутні в прикладних теоріях оболонок.

На основі отриманих асимптотичних розкладів однорідних рішень можна провести оцінки для визначення області застосування існуючих прикладних теорій для циліндричних оболонок. Виходячи з побудованих рішень, можна запропонувати нову уточнену прикладну теорію

**Ключові слова:** неосесиметричне завдання, радіально-неоднорідний циліндр, метод асимптотичного інтегрування, однорідні рішення, прикордонний шар

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.245885

## ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦІЙ ПРУЖНИХ ОБОЛОНОК (с. 43–51)

Irina Polyakova, Raikhan Imambayeva, Bakyt Aubakirova

Будівельні конструкції часто працюють за умов дії динамічних навантажень, як природного, так і техногенного характеру. Розрахунок конструкцій під впливом статичних навантажень досить широко та докладно вивчений. В умовах роботи конструкцій під динамічними навантаженнями проводять додаткові їх випробування, де на конструкції встановлюють вимірювальні прилади для фіксації напруги, деформацій, що виникають при динамічних впливах. Пружні елементи є відповідальним функціональним вузлом багатьох вимірювальних приладів. Тому якість пружних елементів забезпечує стабільність роботи всієї конструкції. Це і визначає підвищену увагу, що приділяється в техніці та будівництві пружним елементам. Раніше була вивчена робота пружних елементів, виконаних з однорідних мономатеріалів, що мають однакові фізичні та геометричні властивості в усіх напрямках і по всій поверхні елемента.

Розглядався пружний елемент як оболонка обертання зі складною формою меридіана та різними фізико-механічними властивостями в різних точках, спричинених нерівномірним армуванням. Передбачалося два види армування – радіальне та кільцеве. Пружні оболонкові елементи (ПОЕ) працюють в умовах динамічного навантаження. Зроблено виведення рівняння для визначення динамічних характеристик неоднорідних пружних елементів. Зроблено аналіз залежності перших трьох власних частот коливань від товщини оболонки та глибини гофрування та перших двох власних частот коливань від товщини оболонки. Розраховані амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) та фазочастотні характеристики (ФЧХ) оболонки залежно від геометричних параметрів. Всі ці результати дозволяють суттєво покращити якість показань приладів, які залежать від чутливості пружних оболонкових елементів. А вона, у свою чергу, залежить від геометричних та фізичних властивостей пружних оболонкових елементів.

**Ключові слова:** фазочастотні характеристики (ФЧХ), амплітудно-частотні характеристики (АЧХ), пружні оболонкові елементи (ПОЕ), граничні умови, геометричні параметри.



---

**DOI: 10.15587/1729-4061.2021.243990****ВИЗНАЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТЕРМОПРУЖНОЇ ВЗАЄМОДІї ТРІЩИНИ І КРИВОЛІНІЙНОГО ВКЛЮЧЕННЯ, РОЗМІЩЕНИХ У КРУГОВІЙ ПЛАСТИНІ (с. 52–58)****В. М. Зеленьк, Л. І. Коляса, М. І. Клапчук, О. Г. Орищин, С. М. Возна**

Побудовано двовимірну математичну модель термопружного стану для кругової пластини, що містить криволінійне включення і тріщину за дії рівномірно розподіленої температури в усій кусково-однорідній пластині. На основі застосування апарату сингулярних інтегральних рівнянь (СІР) задачу зведено до системи двох сингулярних інтегральних рівнянь першого і другого роду на контурах тріщини і включення, відповідно. Одержано числові розв'язки системи інтегральних рівнянь у частинних випадках кругового диска з еліптичним включенням і тріщиною, що міститься у диску поза включенням, а також у включенні. З використанням цих розв'язків визначено коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН) у вершинах тріщини.

Коефіцієнти інтенсивності напружень в подальшому можна використати для визначення критичних значень температури в диску, за якої починається ріст тріщини. Тому така модель в певній мірі відображає механізм руйнування елементів інженерних конструкцій з тріщинами в теплоенергетиці під час робочого процесу і, отже, є актуальною.

Побудовано графічні залежності коефіцієнтів інтенсивності напружень від форми включення, його механічних і теплофізичних характеристик та віддалі до тріщини. Це дає змогу проаналізувати інтенсивність напружень в околі вершин тріщини в залежності від геометричних і механічних факторів.

Результати конкретних досліджень, що наведені у вигляді графіків, можуть бути корисні при розробці раціональних режимів роботи конструкційних елементів у вигляді кругових пластин з включенням, в яких присутня тріщина.

Ця математична модель є розвитком попередніх моделей двовимірних стаціонарних задач теплопровідності та термопружності для кусково-однорідних тіл з тріщинами.

**Ключові слова:** тріщина, включення, термопружність, коефіцієнт інтенсивності напружень, сингулярне інтегральне рівняння.

---

**DOI: 10.15587/1729-4061.2021.246805****ВИЗНАЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОВЕДІНКИ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННОЇ ПЛИТИ В УМОВАХ ПОЖЕЖІ (с. 59–67)****В. С. Некора, С. О. Сідней, Т. М. Шналь, О. В. Некора, І. П. Данкевич, С. В. Поздєєв**

Розглянуті та проаналізовані методи розрахункової оцінки вогнестійкості сталезалізобетонних плит, виготовлених з використанням профільованих сталевих листів, в умовах впливу стандартного температурного режиму тривалістю більше за 120 хв.

Проведені дослідження щодо визначення параметрів нагріву та напружено-деформованого стану сталезалізобетонних плит, виготовлених з використанням профільованих сталевих листів, в умовах теплового впливу стандартного температурного режиму тривалістю більше за 120 хв. Результати даного дослідження надають можливість отримати показники температурного розподілу для проведення оцінки з вогнестійкості таких конструкцій за класами вогнестійкості понад REI 120. Відповідно, отримані результати є науковим підґрунтям для удосконалення існуючого методу розрахункової оцінки вогнестійкості сталезалізобетонних плит, виготовлених з використанням профільованих сталевих листів.

Температурний розподіл у перерізі конструкцій отримано за допомогою загального теоретичного підходу до розв'язку задачі теплопровідності з використанням методу скінчених елементів. Використовуючи отримані температурні розподілення, було визначено параметри напружено-деформованого стану на основі методу граничних станів.

Для проведення розрахунків були створені відповідні математичні моделі, що описують вплив стандартного температурного режиму пожежі, при визначенні розподілу температури в кожну хвилину у перерізах сталезалізобетонної плити із профільованим сталевим листом. Запропоновано спосіб розбиття перерізу на зони для врахування зниження показників механічних властивостей бетону та сталі.

Запропонований спрощений метод розрахункової оцінки сталезалізобетонних плит перекриттів із профільованими сталевими листами, який узгоджується із чинними стандартами Євросоюзу, може бути ефективно використаний для аналізу їх вогнестійкості при встановленні їх відповідності класу вогнестійкості REI 120 та вище.

**Ключові слова:** сталезалізобетонні плити, вогнестійкість плити, теплоізолювальна здатність, напружено-деформований стан, несуча здатність.

---

**DOI: 10.15587/1729-4061.2021.243866****ВИЯВЛЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ДИНАМІЧНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ ТА МІЦНОСТІ НЕСУЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ КРИТОГО ВАГОНА З НАПОВНЮВАЧЕМ В ХРЕБТОВІЙ БАЛЦІ (с. 68–76)****С. В. Панченко, О. В. Фомін, Г. Л. Ватуля, А. О. Ловська, О. М. Багров, Д. В. Федосов-Ніконов, А. В. Рибін**

Проведено визначення динамічної навантаженості та міцності несучої конструкції критого вагона при експлуатаційних режимах. Особливістю несучої конструкції вагона є те, що хребтова балка має замкнений переріз. Для зменшення динамічної навантаженості рами хребтова балка заповнена матеріалом з пружно-в'язкими властивостями. Таке рішення сприятиме перетворенню кінетичної енергії удару (ривка, розтягнення, стискання) в роботу сил пружно-в'язкого тертя, а отже і зниженню навантаженості несучої конструкції.

Для обґрунтування запропонованого удосконалення проведено математичне моделювання динамічної навантаженості несучої конструкції критого вагона. Розрахунок здійснений для випадку маневрового співударяння. Дослідження проведені у плоскій системі координат. Встановлено, що максимальні прискорення, які діють на несучу конструкцію критого вагона, складають близько  $37 \text{ м/с}^2$ . Розрахована величина прискорення на 3,2 % нижча за ту, що отримана для несучої конструкції критого вагона без наповнювача.

Наведено результати розрахунку на міцність несучої конструкції критого вагона. При цьому застосований метод скінчених елементів. Максимальні еквівалентні напруження при цьому виникають в зонах взаємодії хребтової балки зі шворневими та складають 319,5 МПа, що на 8 % нижче за допустимі. Розрахунок здійснений і стосовно інших експлуатаційних режимів навантаження несучої конструкції вагона.

Здійснено верифікацію моделі динамічної навантаженості несучої конструкції критого вагона за F-критерієм.

Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування інноваційних конструкцій рухомого складу та підвищенню ефективності його експлуатації.

**Ключові слова:** транспортна механіка, критий вагон, несуча конструкція, динамічна навантаженість, інноваційний вагон.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.247526

## ВИКОРИСТАННЯ АСИМПТОТИЧНОГО НАБЛИЖЕННЯ МОДЕЛІ МАКСВЕЛ ЕЛЕМЕНТ ДЛЯ АНАЛІЗУ НАПРУГ У КОНВЕЄРНИЙ СТРІЧЦІ (с. 77–84)

О. М. Пігнастий, С. М. Чернявська

Розглянуто особливості поширення динамічної напруги в конвеєрній стрічці, властивості матеріалу якої відповідають моделі Maxwell element. Представлено аналітичні вирази для розрахунку динамічного модуля пружності, модуля втрат та кута механічних втрат залежно від частоти поздовжніх коливань у стрічці протяжного транспортного конвеєра. Для аналізу процесу поширення динамічних напруг запроваджено безрозмірні параметри, що характеризують специфічні особливості перебігу в'язко-пружного процесу в конвеєрній стрічці, властивості матеріалу якої відповідають моделі Maxwell element. Виконано перехід до безрозмірної моделі Maxwell element та здійснено аналіз взаємозв'язків між напругою та деформацією елемента конвеєрної стрічки для гранично великих та малих значень безрозмірних параметрів. Дано обґрунтування сфери застосування моделі Maxwell element. Показано, що при досить високих частотах поздовжніх коливань напруги в конвеєрній стрічці, при яких період коливань набагато менше характерного часу згасання коливань, взаємозв'язок між напругою та деформацією конвеєрного елемента стрічки відповідає закону Гука. Проведено якісний аналіз тривалості часу релаксації матеріалу конвеєрної стрічки, властивості якого відповідають моделі Maxwell element. Досліджено режим функціонування конвеєра із постійною швидкістю деформації елемента стрічки; режим, при якому до елемента стрічки раптово прикладена постійна за величиною навантаження; режим функціонування конвеєра з миттєво доданим навантаженням до елемента стрічки. Визначено, що у випадках, коли характерний час процесу значно перевищує час релаксації напруги в конвеєрній стрічці або період поздовжніх коливань багато менше часу релаксації напруги в конвеєрній стрічці, модель Maxwell element може бути замінена з достатнім ступенем точності моделлю Hooke element.

**Ключові слова:** в'язко-пружний процес, Maxwell element, Hooke element, транспортний конвеєр, динамічний модуль пружності, конвеєрна стрічка.

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.246751

## ВИЯВЛЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ КОЛИВАНЬ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНИХ ТРУБОПРОВОДІВ (с. 85–92)

Ulanbator Suleimenov, Nurlan Zhangabay, Akmaral Utelbayeva, Nasir Mohamad, Arman Moldagaliyev, Khassen Abshenov, Svetlana Buganova, Saltanat Daurbekova, Zaure Ibragimova, Aibarsha Dosmakanbetova

Розглянуто конструктивне рішення магістрального надземного трубопроводу із попередньо напруженою обмоткою, що дозволяє підвищити ефективність роботи та знизити матеріаломісткість. Наведено результати експериментальних досліджень особливостей роботи попередньо напружених трубопроводів при статичних експлуатаційних навантаженнях. Показано, що радіальні переміщення стінки попередньо напруженого трубопроводу стиснуті обмоткою, що напружується, яка перешкоджає її деформуванню. Виявлено, що збільшення зусилля натягу дроту обмотки знижує кільцеву напругу в стінці трубопроводу в 1,3...1,6 рази та підвищує меридіональні – в 1,2...1,4 рази.

Експериментальними дослідженнями моделей попередньо напружених трубопроводів при вільних вертикальних та горизонтальних коливаннях встановлено залежність частотних характеристик від експлуатаційних умов та параметрів попередньої напруги. Встановлено, що огинаюча амплітуд за осцилограмою вільних затухаючих коливань має форму експоненти, яка вказує на демпфуючий вплив попередньої напруги. Аналіз зміни динамічних характеристик моделей залежно від зусилля попередньої напруги показав, що частоти вільних коливань збільшуються в 1,5–1,6 рази, а декремент коливань зменшується в 1,2–1,25 рази.

Наведено результати дослідження впливу параметрів попередньої напруги на напружено-деформований стан моделі трубопроводу при вимушених горизонтальних та вертикальних коливаннях.

Показано, що епюри кільцевої динамічної напруги та деформації в моделях попередньо напруженого трубопроводу більш згладжені в порівнянні з аналогічними характеристиками звичайного трубопроводу, випробуваних при однакових експериментальних параметрах.

Результати роботи дозволили виявити кількісно особливості роботи попередньо напруженого трубопроводу при статичних та динамічних впливах з урахуванням параметрів попередньої напруги та умов експлуатації.

**Ключові слова:** попередньо напружений трубопровід, обмотка дроту, експериментальний аналіз коливань, вільні затухаючі коливання, вимушена вібрація.

---

**DOI: 10.15587/1729-4061.2021.246852****ПРОБЛЕМА ГІДРАВЛІЧНОГО РОЗРАХУНКУ НАПІРНИХ РОЗПОДІЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ (с. 93–103)****В. В. Чернюк, Р. М. Гнатів, О. А. Кравчук, В. І. Орел, І. В. Бігун, М. В. Чернюк**

Більшість виробничих технологій потребують рівномірної шляхової роздачі рідини з напірних розподільних трубопроводів. Для досягнення цієї мети запропоновано увести у потік рідини полімерні добавки або виготовляти конфузори розподільні трубопроводи з неперервною поздовжньою щілиною у стінці. Для зменшення нерівномірності роботи розподільного трубопроводу при дискретній роздачі рідини запропоновано застосовувати циліндричні поворотні вихідні насадки з бічним ортогональним входом струменя у насадку. Проблемою є відсутність методів точного гідравлічного розрахунку роботи розподільних трубопроводів. Адекватні методи розрахунку ґрунтуються на диференціальних рівняннях.

Актуальним є знаходження точного розв'язання диференціального рівняння руху рідини зі змінною шляховою витратою для дірчастих розподільних трубопроводів, бо досі його не існує. Наявні методи розрахунку ураховують тільки прямі кути від'єднання струменів від потоку у розподільному трубопроводі. Ці методи засновано на допущеннях, що коефіцієнт гідравлічного тертя та коефіцієнт опору вихідних отворів незмінні уздовж потоку. Запропоновано метод розрахунку, який урахує змінування значень цих коефіцієнтів опору уздовж розподільного трубопроводу. Також ураховано кінематичні та фізичні характеристики потоку, котрий омиває розподільний трубопровід зовні. Експериментально перевірено точність розрахунків значення витрат води, котра роздається з розподільного трубопроводу. Похибка обчислень витрат води методом, який допускає, що значення коефіцієнтів опору незмінні уздовж розподільного трубопроводу, сягає 18,75 %. За запропонованим методом розрахунку ця похибка не перевищує 6,25 %. Однак, обидва методи придатні для розрахунку напірних розподільних трубопроводів за умови, що кути від'єднання струменів прямі.

Урахування змінування від 90° до 360° кута від'єднання струменів від потоку у розподільному трубопроводі розширить границі застосування та точність розрахункових методів.

**Ключові слова:** напірний розподільний трубопровід, напірний рух рідини зі змінною шляховою витратою.